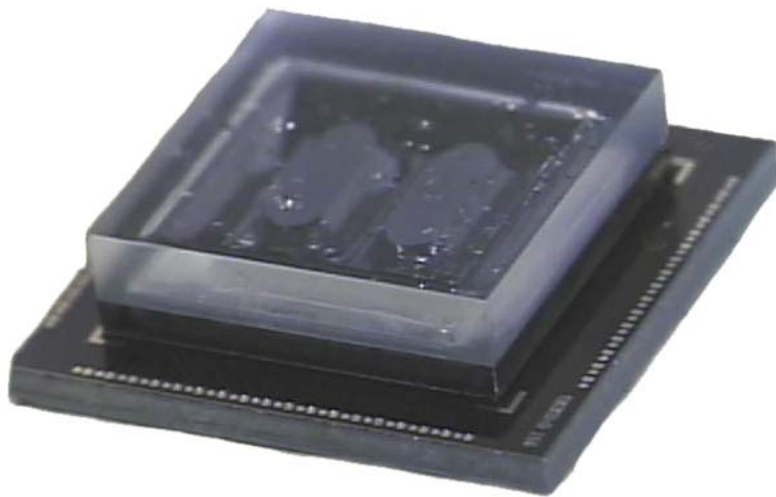




Universitat Autònoma de Barcelona

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

# *Un nou encapsulat multixip per a acceleròmetres piezoresistius*



Memòria presentada per Anna Collado Miguens  
per optar al grau de Doctor en Enginyeria Electrònica.

Cerdanyola del Vallès, Gener 2003

Enric Cabruja i Casas, Científic Titular del CSIC en el Centre Nacional de Microelectrònica i Professor Associat del Departament d'Enginyeria Electrònica de la Universitat Autònoma de Barcelona

CERTIFICA:

Que la memòria titulada “Un nou encapsulat multixip per a acceleròmetres piezoresistius” ha estat realitzada sota la seva direcció per N'Anna Collado Miguens, Llicenciada en Física per la Universitat Autònoma de Barcelona i que constitueix la seva Tesi Doctoral per optar al Grau de Doctor en Enginyeria Electrònica.

Enric Cabruja i Casas

Cerdanyola del Vallès, Gener 2003.

---

<b>Capítol 1. Introducció.</b>	3
1.1. Estat de l'art de l'encapsulat de MEMS.	3
1.1.1. Tècniques i materials per l'encapsulat de MEMS.	4
1.1.1.1. Materials en l'encapsulat de MEMS.	5
1.1.1.2. Tècniques d'encapsulat de MEMS.	6
1.2. Smart Sensors.	10
1.3. Objectiu de la Tesi.	11
1.4. Organització de la Tesi.	12
1.5. Referències.	13
<b>Capítol 2. Tecnologies implementades.</b>	15
2.1. Tecnologia de sensors d'acceleració.	16
2.1.1. Principi d'operació dels acceleròmetres piezoresistius.	17
2.1.2. Tecnologia de fabricació d'acceleròmetres piezoresistius.	22
2.1.2.1. Micromecanitzat en volum.	22
2.1.2.2. Micromecanitzat superficial.	23
2.1.2.3. Micromecanitzat sobre oblies BESOI.	23
2.1.3. Aplicacions dels acceleròmetres piezoresistius.	26
2.2. Tecnologia de mòduls multixip.	26
2.2.1. MCM-D: Mòdul Multixip de substrat de silici.	27
2.2.2. Arquitectura dels mòduls multixip.	28
2.2.3. Disseny funcional del MCM.	32
2.2.4. Fabricació del substrat MCM.	32
2.2.4.1. Tecnologia MCM Pura.	37
2.2.4.2. Tecnologia CNM25&MCM.	37
2.2.4.3. Tecnologia CNM25-MCM.	38
2.2.5. Adequació dels xips comercials.	39
2.2.6. Aplicacions de l'encapsulat MCM-D.	40
2.3. Referències.	40
<b>Capítol 3. Disseny d'un MCM-Sensor.</b>	45
3.1. Introducció.	45
3.2. Simulació i disseny dels acceleròmetres.	47
3.2.1. Simulacions per elements finits.	47
3.2.2. Acceleròmetre cantilever amb sistema d'autotest.	49
3.2.3. Acceleròmetre triaxial.	58
3.2.4. Layout dels acceleròmetres.	67
3.3. Disseny del xip de test.	69
3.3.1. Els elements de test: L'estructura Rosette.	70
3.3.2. Simulacions del xip de test.	72
3.4. Simulacions del procés de soldadura.	74
3.4.1. Teoria del comportament del material de soldadura.	74
3.4.2. Construcció del model.	76
3.4.3. Resultats pel model triaxial.	77

3.4.4. Resultats pel disseny uniaxial.	80
3.4.5. Resultats pel xip de test.	82
3.5. Disseny dels substrats MCM.	83
3.5.1. Substrat de test.	83
3.5.2. Substrat intel·ligent.	84
3.6. Conclusions.	89
3.7. Referències.	90
<b>Capítol 4. Fabricació i muntatge del mòdul multixip.</b>	<b>93</b>
4.1. Fabricació d'acceleròmetres sobre oblies BESOI.	94
4.2. Fabricació del substrat MCM.	99
4.2.1. Fabricació del substrat de test.	99
4.2.2. Fabricació del substrat intel·ligent.	100
4.3. Encapsulat i muntatge dels dispositius.	101
4.3.1. Soldadura anòdica.	102
4.3.2. Dipòsit pasta de soldadura	103
4.3.3. Muntatge flip-chip.	105
4.3.4. Refosa de la pasta de soldadura.	105
4.3.5. Problemes derivats de l'encapsulat flip-chip.	108
4.4. Conclusions.	110
4.5. Referències.	111
<b>Capítol 5. Caracterització dels sensors.</b>	<b>113</b>
5.1. Extracció paràmetres tecnologia de sensors.	114
5.2. Caracterització del procés d'encapsulat.	116
5.2.1. Mesures del xip de test.	116
5.2.2. Mesures de les rosettes dels acceleròmetres	118
5.3. Caracterització estàtica dels acceleròmetres.	120
5.3.1. Resultats per l'encapsulat en TO-8.	121
5.3.2. Resultats per l'encapsulat MCM.	128
5.4. Caracterització dinàmica	132
5.4.1. Descripció del sistema de mesura en dinàmic.	137
5.4.2. Resultats per l'escombrat en acceleració.	137
5.4.3. Resultats per l'escombrat en freqüència.	139
5.5. Conclusions	140
5.6. Referències.	142
<b>Capítol 6. Conclusions.</b>	<b>143</b>
<b>Annex A</b>	<b>A.1</b>
<b>Annex B</b>	<b>B.1</b>
<b>Annex C</b>	<b>C.1</b>

# Capítol 1 . Introducció.

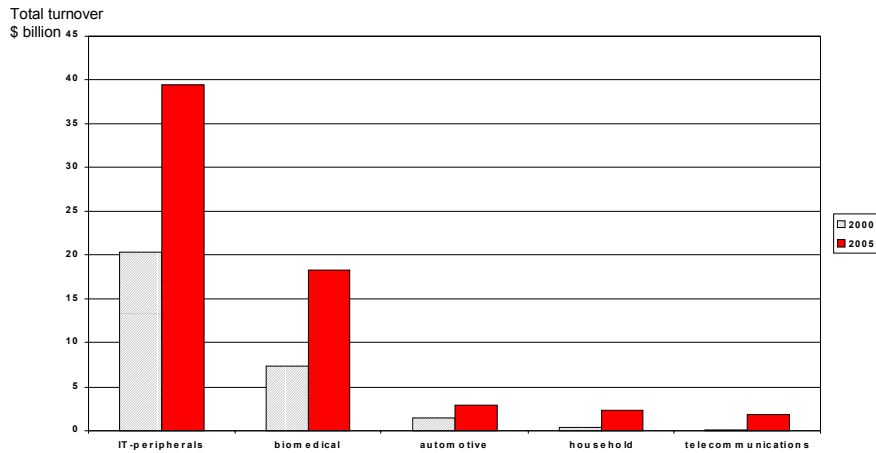
## 1.1 Estat de l'art de l'encapsulat de MEMS.

En la definició de sistemes microelectromecànics o MEMS (*Micro ElectroMechanical Systems*) s'agrupen tots aquells microsistemes o microdispositius que combinen l'existència d'elements elèctrics i mecànics. La fabricació d'aquests dispositius està basada en la combinació de tècniques microelectròniques, pròpies de la indústria de circuits integrats, i tècniques de micromecanitzat del silici. Amb aquesta tecnologia es dissenyen estructures 3D per a la definició de sensors i actuadors.

Des de els seus inicis a la dècada dels 70, els MEMS ja apareixien com uns components prometedors, però no va ser fins a la maduresa de la seva tecnologia als anys 80 que van aparèixer els primers sensors de pressió comercials. En la actualitat, entre els productes MEMS més emprats es troben els capçals d'injecció de tinta, els capçals de lectura/escriptura de disc dur, els marcapassos, els sensors de pressió i els acceleròmetres per a la indústria de la automoció.

En l'estudi de mercat per microsistemes presentat per NEXUS [1], es preveu un creixement en la facturació d'aquests dispositius a tot el mercat mundial, des de 30 mil milions d'euros a l'any 2000 fins a 68 mil milions per a l'any 2005, el que suposa un creixement d'un 20% anual. La distribució d'aquest mercat entre les diferents àrees d'aplicació s'il·lustra a la Figura 1.1.

### MST Application Fields 2000 and 2005



**Figura 1.1: Distribució del mercat de microsistemes pels anys 2000 i 2005.**

La previsió per l'any 2005 és que el mercat continuï clarament liderat pels perifèrics d'ordinador, les aplicacions biomèdiques, amb nous productes com els sistemes de subministrament de medicaments i els bio-chips, i per la indústria de l'automoció. Aquest estudi també preveu la irrupció amb molta importància de nous dispositius MEMS com els components òptics (MOEMS) i els RF-MEMS per telecomunicacions.

Malgrat aquestes importants xifres, el creixement dels MEMS no es pot comparar al desenvolupament, que al seu moment, van tenir els circuits integrats. El factor que limita la seva plena implantació al mercat és el seu encapsulat o, més concretament, la manca d'una tecnologia d'encapsulat estàndard i de baix cost. Els problemes amb l'encapsulat de sensors, provenen del fet que, en molts casos, aquests necessiten estar en contacte amb el mitjà que els envolta, o bé presenten estructures mòbils que requereixen estar protegides de l'ambient [2], [3]. Aquests requeriments especials provoquen que l'encapsulat de MEMS es dissenyi conforme l'aplicació final del dispositiu i, per tant, ens trobem davant d'encapsulats específics i inherentment *non-standard*. Així doncs, existeix gairebé una impossibilitat de dissenyar un encapsulat estàndard per sensors degut a la gran variabilitat de dispositius i de les seves aplicacions. A aquestes dificultats se li afegeix el fet que el desenvolupament de l'encapsulat, per la seva importància en el producte final, es duu a terme principalment a les indústries on es tracta com a informació confidencial i molt valuosa. Tots aquest factors han alentit i alenteixen la plena implementació dels MEMS al mercat.

#### 1.1.1 Tècniques i materials per l'encapsulat de MEMS.

La tecnologia d'encapsulat de sensors, si bé ha evolucionat a partir de la tecnologia estàndard de semiconductors, s'ha diversificat extremadament tant en materials com en tècniques emprades. Això és a causa de l'extrema diversificació en el disseny dels sensors i en les seves aplicacions, ex. sensors químics, de pressió, de temperatura, de fluxe, acceleròmetres.

Les funcions principals que ha de complir un encapsulat és que proporcioni un embolcall robust, unes connexions elèctriques fiables i que no afecti al comportament del dispositiu. Aquestes consideracions es poden dividir en tres tipus: elèctric, tèrmic i mecànic. Entre les característiques elèctriques es requereix que les connexions siguin de baixa resistivitat i mínima inductància. Les consideracions en el disseny tèrmic rau en el fet d'aconseguir evacuar la calor generada bé pel sensor, bé per la circuiteria que el pugui acompanyar, per tal d'evitar variacions de la resposta del sensor amb la temperatura o fallides a llarg termini degudes a una elevada temperatura d'operació. Quant a les consideracions mecàniques es necessita que l'encapsulat proporcioni un suport mecànic fiable al sensor, i que no pateixi d'estressos mecànics que puguin arribar a provocar fallides en les connexions o en el muntatge del propi xip.

En el cas de l'encapsulat de sensors a més d'aquests requeriments de tipus general ens trobem amb d'altres d'específics relacionats amb l'aplicació del sensor. Alguns d'aquests requeriments són: la definició d'obertures a l'encapsulat per posar les àrees actives en contacte amb el medi, ex; sensors gasos, pressió. La protecció de la interfície electrònica en el cas d'exposició a ambients agressius, ex. Sensors químics. L'elecció de materials amb diferències mínimes en els coeficients d'expansió per tal d'evitar stressos termo-mecànics que pugin influir en el comportament de sensors sensibles a l'estrès, com els sensors de pressió o els basats en l'efecte piezoresistiu.

Així doncs, veiem que l'encapsulat de sensors requereix d'un esforç de desenvolupament més important que pel cas dels ICs. Per cada aplicació es fa necessària una elecció acurada dels materials i dels processos emprats en el procés d'encapsulat. A continuació farem un recull de les tècniques i dels materials més utilitzats.

#### 1.1.1.1 Materials en l'encapsulat de MEMS.

Un dels problemes més importants que afecta a l'encapsulat són els stressos termo-mecànics. Aquest tipus d'estrès es dona quan dos materials es deformen de manera diferent en una excursió tèrmica. Als encapsulats plàstics els stressos derivats de l'expansió tèrmica no només podem provocar problemes piezoresistius al silici sinó que poden estar relacionats amb la fallida total del dispositiu. S'ha comprovat que poden provocar cracks al xip, problemes d'adhesió i fallides dels fils de connexió. Els dos nivells on es poden donar aquest stressos és a l'interfície entre el xip i el material d'adhesió i entre aquest i la base de l'encapsulat.

Els mecanismes d'adhesió del xip al substrat poden ser per mitjans d'un adhesiu, de soldadura eutèctica, de soldadura anòdica entre altres [4]. En l'elecció dels materials d'adhesió del xip a la base s'ha de tenir en compte la seva temperatura de processat, la seva conductivitat tèrmica i el seu mòdul de Young. Per exemple, pel muntatge d'un acceleròmetre es podria dir que els materials més adequats seria aquells amb un valor baix de mòdul de Young. D'aquesta manera seria el material de l'encapsulat el que absorbiria els stressos i no els transmetria al transductor. Però per altre banda aquests solen ser els més flexibles i per tant poden provocar problemes de deriva del senyal a llarg termini.

Per a sensors els encapsulats més utilitzats son els encapsulats ceràmics i metàl·lics doncs sovint es requereix d'un encapsulat hermètic. A la Taula 1.1 es recullen alguns dels

paràmetres més rellevants per a materials emprats com a base d'encapsulat i es comparen amb els valors pel silici.

Materials		CTE (ppm/°C)	Conductivitat tèrmica (W/m·K)	Tensile Strength (MPa)
	Silici	2.6	150	
Metalls	Alumini	21	250	45
	Acer inoxidable	17	6	700
	Kovar	5.3	17	517
Ceràmics	Alúmina	6.5	22	300
	Vidre-ceràmic	2.5	2	200
	AlN	4	100-170	300

**Taula 1.1: Propietats mecàniques i tèrmiques dels materials més utilitzats en l'encapsulat de sensors [5].**

De entre els metalls trobem que el Kovar és un dels que té un coeficient d'expansió tèrmica més proper al silici, però a la vegada té una conductivitat tèrmica molt més baixa si la comparem amb l'alumini. L'alumina és un dels materials més emprats en l'encapsulat pel seu bon compromís entre el coeficient d'expansió i la conductivitat tèrmica. El seu coeficient d'expansió tèrmic, molt proper al del silici, permet el muntatge del xip directament sobre el substrat, però si es necessita més dissipació tèrmica cal emprar, doncs, el nitrur d'alumini. El vidre ceràmic té un CTE que s'ajusta molt bé al del silici, però la seva conductivitat és molt baixa.

#### 1.1.1.2 Tècniques d'encapsulat de MEMS.

Com ja hem dit existeix una gran diversificació en el camp d'encapsulat de sensors, però es poden identificar tres nivells generals d'encapsulat: L'encapsulat a nivell d'oblia, l'encapsulat individual i l'aproximació dels mòduls multixip. A continuació descriurem cadascun d'ells i donarem alguns exemples d'aplicacions amb sensors d'acceleració.

##### ❑ *Encapsulat a nivell d'oblia (Wafer level packaging).*

La idea d'adreçar el problema de l'encapsulat ja a nivell d'oblia és la de proporcionar una protecció inicial als dispositius MEMS davant de processos com el serrat o l'encapsulat posterior. A més molts dispositius necessiten de cavitats hermètiques amb ambient controlat o de buit per aconseguir un bon comportament dels xips o un increments de la vida d'operació del dispositiu. Així doncs es persegueix que la fabricació d'aquestes cavitats sigui compatible amb la fabricació dels dispositius i que, per tant, sigui de baix cost. Varies tècniques es descriuen com encapsulat a nivell d'oblia, entre elles podem diferenciar entre els processos de soldadura d'oblia i els processos integrats.

Entre les tècniques de soldadura d'oblia trobem la soldadura anòdica, l'eutèctica o bé l'ús d'adhesius. La **soldadura anòdica** consisteix en l'aplicació d'una tensió electrostàtica entre l'oblia de silici i una altre de silici o vidre. En el cas de la soldadura anòdica silici-silici entre les dues oblies es diposita una fina capa de vidre borosilicat. El procés es realitza a



temperatures d'entre 300 i 450°C de manera que es produeix una unió química entre les superfícies de silici i vidre en contacte. La soldadura amb vidre és de les més emprades pel muntatge de sensors, doncs la CTE dels vidres especials per soldadura és molt propera a la del silici. Gràcies a les tècniques de gravat del vidre i del silici, aquesta tècnica s'empra pel el disseny de cavitats tancades o canals d'accés a l'ambient, per ex. Sensors de pressió, aplicacions de microfluídica.

En el cas de la **soldadura eutèctica silici-silici** es col·loca una fina capa de metall entre les dues oblies. Aquesta capa quan es refon forma un aliatge eutèctic amb el silici, per tant creant una soldadura. La temperatura de fusió d'aquest aliatge, normalment Au/Si, és de 363°C. L'avantatge d'aquesta tècnica prové de que no hi ha l'aplicació d'un voltatge electrostàtic que eventualment pot perjudicar els circuits CMOS. Per altre banda, la utilització de metalls com l'or pot causar contaminació en l'electrònica.

La **soldadura amb adhesius** destaca per les seves baixes temperatures de procés al voltant de 150°C. Els materials emprats en aquesta soldadura son epoxies o silicones les quals tenen un baix mòdul de Young que les fan adequades per a l'absorció d'estressos per part de l'encapsulat. La diferència amb les altres tècniques es que la soldadura no és hermètica, però es pot realitzar sobre diferents materials de substrats: metall, vidre, ceràmica, plàstic.

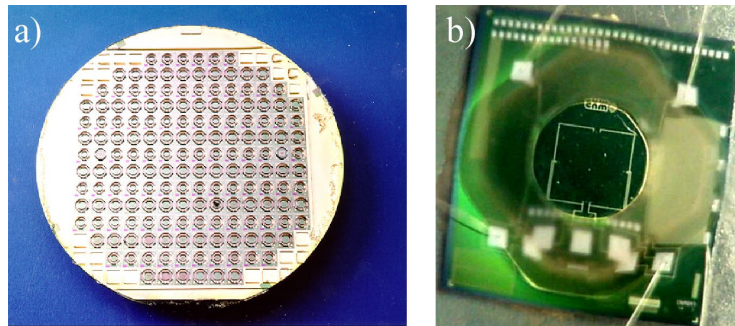
La Taula 1.2 és un recull de les característiques més destacades de les tècniques de soldadura. S'han inclòs els paràmetres més rellevants com poden ser el coeficient d'expansió tèrmic (CTE), la conductivitat tèrmica de la soldadura i la temperatura de procés.

Paràmetres	Mètodes			
	<i>Soldadura anòdica</i>	<i>Soldadura eutèctica</i>	<i>Soldadura</i>	<i>Soldadura amb epoxi</i>
<i>Material adhesió</i>	Vidre Pyrex	Au/Si (97/3)	Sn/Pb	Epoxi (70%Ag)
<i>CTE (ppm/K)</i>	2.9	12	27	28
<i>Conductivitat tèrmica (W/m·K)</i>	1.1	27	35	1.2
<i>Mòdul de Young (GPa)</i>	63	83	14	2.7
<i>Temperatura de procés (°C)</i>	300-450	400	200	150
<i>Metal·lització del xip</i>	No	Ti/Ni/Au	Ti/Ni/Au,Ag	Ni/Au

**Taula 1.2: Característiques més destacades dels diferents processos de soldadura.**

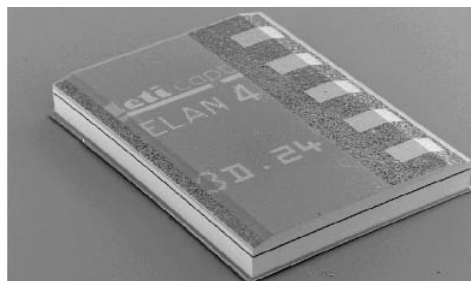
Entre els **processos integrats** trobem el dipòsit de capes de silici epitaxial o nitrur de silici, per tal de crear càpsules que tanquin les microestructures, o l'estructuració de polímers per a la protecció o la definició de canals d'accés [6], [7]. L'avantatge de la utilització de capes dipositades i capes sacrificials per crear cavitats hermètiques és que es realitzen amb tècniques microelectròniques i en una ambient controlat fet que permet el control de l'ambient a l'interior de les cavitats. A més el gruix d'aquestes capes és molt inferior al gruix de les oblies emprades en la soldadura d'oblia de manera que el xip pot ser tractat posteriorment per la maquinària de muntatge o de encapsulat de plàstic estàndard. Un exemple de l'estructuració de polímers es mostra a la Figura 1.2. Una silicona fotocurable

s'estructura sobre tota la oblia, mitjançant un motlle, per crear obertures cap a l'àrea activa del sensor per una aplicació de sensor de flux.



**Figura 1.2:** Fotografies de l'encapsulat a nivell d'oblia d'un sensor de pressió mitjançant la estructuració d'una capa de silicó (H. Krassow).

Entre les aplicacions més novadores de l'encapsulat a nivell d'oblia cal d'estacar la proposta de Tronic's Microsystems que presenta un encapsulat a nivell de xip (*chip-scale package*) fent servir tècniques de *wafer-level packaging* [8]. El dispositiu és un sensor capacitiu amb tecnologia de micromecanitzat superficial per aplicacions mèdiques. Sobre la oblia de sensors es solda un oblia de silici sobre la que prèviament s'han realitzat obertures per gravat anisotròpic per accedir a les sortides del sensor. A continuació en els pads del MEMS es realitza soldadura amb fil d'or i les obertures es tanquen amb resina. Un cop s'ha curat la resina, els fils i la resina són polits fins a aconseguir un encapsulat pla. El pas final es el tallat de la oblia. El resultat és el que es mostra a la Figura 1.3.



**Figura 1.3:** Exemple d'un encapsulat CSP per a un sensor inercial. (TRONIC'S Microsystems)

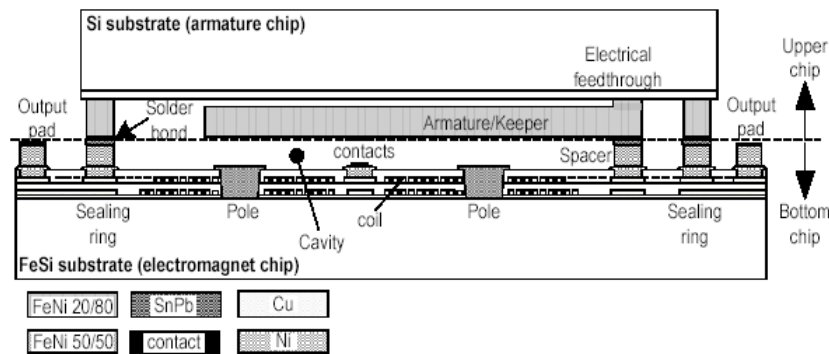
□ **Encapsulat individual (Single chip Packaging).**

En l'encapsulat individual de MEMS es fan servir els estàndard pels circuits integrats com poden ser els metàl·lics, ceràmics o *pre-moulded plastic packages*. Aquesta aproximació és la més emprada tot i que són una barrera per a la seva aplicació en solucions de baix cost. Pels dispositius que necessiten una obertura a l'ambient s'han desenvolupat tècniques de *transfer moulding* que poden deixar camins d'accés a l'àrea activa del sensor per accedir a l'exterior, però aquesta mena d'encapsulats no són vàlids per ambients hostils [9]. Els encapsulats de plàstic, per exemple, poden ser un problema pels sensors piezoresistius degut a les diferències de CTE entre els materials.

□ **Mòduls multixip (Multichip Module packaging).**

Els mòduls multixip o la opció híbrida és la que es presenta com l'opció més viable a l'hora d'integrar el sensor amb l'electrònica o combinar xips de diferents tecnologies en un mateix muntatge. L'encapsulat multixip aporta una gran flexibilitat en el disseny dels elements que componen el mòdul i en l'elecció, tant dels materials del substrat (ceràmic, Pyrex o de silici) com amb les tècniques de connexionat entre ells (*wire-bonding*, *flip-chip*, etc.). D'entre les tècniques de connexionat la tècnica *flip-chip* està considerada com una de les més prometedores per l'encapsulat de MEMS, tant sobre silici com per *chip-scale packaging* o *chip-on board*. El *flip-chip* aporta una menor despesa d'àrea al substrat, respecte les altres tècniques de connexió elèctrica, i a més el seu muntatge pot ser un procés de processament per lots, augmentant així el ritme de fabricació. Per aplicacions d'alta freqüència, la tècnica *flip-chip* és la que aporta menys inductàncies i capacitats paràsites en les connexions. Un dels avantatges més interessant que pot aportar aquesta tècnica als dispositius MEMS, és la possibilitat de crear cavitats o estructures que s'integrin directament en el funcionament d'aquests. El muntatge *flip-chip* es pot realitzar sobre diferents substrats, amb diferents materials de soldadura i utilitzant diferents tècniques de soldadura. La qüestió quan es treballa amb MEMS és estudiar quines d'aquestes tècniques i materials no afecten al seu comportament i avaluar quina d'elles és la millor per a cada aplicació. Per sensors que tenen com a principi de detecció elements piezoresistius, el muntatge sobre substrat de Pyrex o ceràmic pot aportar estressos al dispositiu i, per tant, en aquesta aplicació no seria adequat [10].

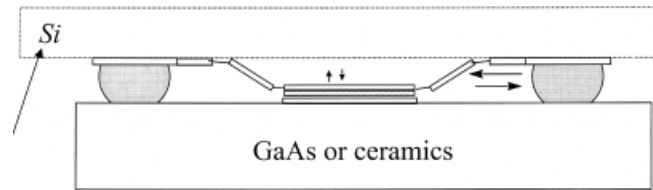
En aplicacions optoelectròniques, el *flip-chip* és ja àmpliament utilitzat per la seva capacitat d'autoaliniament. En aquest cas, les tècniques de muntatge que s'utilitzen són tècniques *fluxless* o dit d'una altra manera, tècniques netes que no perjudiquin el comportament dels xips òptics [11].



**Figura 1.4: Exemple d'un electro-magnètic microrelé fabricat emprant la tècnica *flip-chip* (Font: CSEM S.A., Suïssa)**

Una altra aplicació molt estesa és en el disseny d'estructures com capacitats o microinterruptors electro-mecànics que fan ús del gap d'aire entre el *flip-chip* i el substrat [12], [13]. Un esquema d'un microrelé actuat electromagnèticament fabricat per CSEM S.A es mostra a la Figura 1.4. El substrat incorpora una bobina de Coure que fa actuar el relé fabricat amb una capa electrodepositada de NiFe(80/20). El procés de muntatge es basa en la soldadura de Sn/Pb amb Or. Es dissenya un marc tancat amb una capa Ni de 20µm sobre el qual es diposita la capa de Sn/Pb de 2µm. Els gruixos d'aquestes capes han de ser molt controlats, doncs el gruix d'aquest marc és la distància d'actuació del relé que a la vegada

determina el voltatge d'actuació i la tensió de ruptura. Un cop fet el muntatge, el marc de Ni i Sn/Pb forma una cavitat hermètica que permet fer actuar el relé en un ambient controlat o de buit.



**Figura 1.5: Exemple d'una capacitat ajustable realitzada amb muntatge *flip-chip*.**

A la Figura 1.5 és mostra un exemple d'una capacitat ajustable per aplicacions RF. La capacitat està fabricada sobre una obllia de silici la qual, un cop fet el muntatge *flip-chip*, es grava completament en HF per eliminar les pèrdues a través dels silici [14]. L'alçada de la capacitat es varia mitjançant uns actuadors electro-tèrmics. El procés de soldadura està basat en la soldadura termoacústica amb boles d'indi. En aquest cas la tecnologia de muntatge s'ha hagut d'ajustar fins a obtenir un control en l'alçada de les boles de  $0.1\mu\text{m}$ .

En el cas de dispositius que hagin de tenir una obertura al medi, com els anemòmetres, el muntatge *flip-chip* no és tan útil, doncs la cara activa del xip rau contra el substrat i per tant no queda accessible. Per a solucionar aquest problema F. Mayer et al. van proposar al 1998, el muntatge *flip-chip* del sensor sobre un substrat ceràmic el qual tenia una obertura que donava accés al sensor [15].

Dels apartats anteriors s'extreu que les línies de treball en el camp d'encapsulat de microsensors estan molt diversificades i que per cada aplicació cal avaluar quina és la millor opció.

## 1.2 Smart Sensors.

Per a la integració d'electrònica amb MEMS hi ha dues aproximacions a estudiar: l'aproximació integrada i la híbrida, dins la qual s'inclouen els mòduls multixip.

Els beneficis de la solució integrada són una reducció en les dimensions i una millor relació senyal-soroll. En contraposició, la complexitat tant en el disseny com en la fabricació d'aquest *Smart Sensors*, així com, sovint la incompatibilitat entre els processos CMOS i MEMS fan reduir considerablement el rendiment del procés de fabricació [16]. A conseqüència d'això la opció integrada és utilitzada només en aplicacions d'elevades prestacions i gradualment en el disseny flexible de *Smart Sensors* la indústria es decanta cada cop més cap a la versió híbrida o multixip. Els mòduls multixip aporten més flexibilitat en el disseny de l'aplicació i a més permeten la fabricació dels sensors i de l'electrònica per separat, fet que augmenta el rendiment de la fabricació a costa d'un esforç extra en el disseny de l'encapsulat.

El primer acceleròmetre comercial integrat monolíticament el va presentar *Analog Devices* i estava basat en el principi de detecció capacitiu del moviment en el pla d'una estructura interdigitada. Al mateix temps, Temic's presentava un *Smart Sensor* per un pont

cantilever amb mesura piezoresistiva [17]. En l'actualitat *Analog Devices*, encara oferta una línia d'acceleròmetres integrats amb IC, iMEMS<sup>®</sup> [18].

Dintre de l'aproximació multixip l'esquema que més s'ha enfocat és la del muntatge silici sobre silici amb connexionat *wire-bonding* entre els diferents xips del mòdul. El substrat pot contenir circuiteria CMOS o únicament ser emprat com a substrat d'interconnexió. Un exemple d'*Smart Sensors* sobre substrat ceràmic és la tecnologia HDI (*High Density Interconnect*). Els xips es munten dins de cavitats realitzades amb làser en el substrat ceràmic. Posteriorment, sobre els components es fabrica l'estructura d'interconnexió mitjançant tècniques *thin-film* [19]. Un avantatge d'aquesta tècnica és que els xips no necessiten de cap tractament abans del muntatge ja que les interconnexions es realitzen directament sobre els pads d'alumini. No obstant, la eficiència d'encapsulat no és tan elevada com amb un multixip 3D, i a més la utilització d'un làser per a realitzar les cavitats a l'alumina encareix el procés.

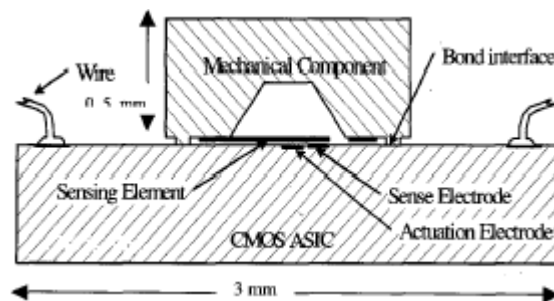


Figura 1.6: Acceleròmetre capacitiu sobre un substrat CMOS (AS-8310, Austria Microsystems).

Austria Microsystems, presenta una versió a mig camí de la concepció monolítica i la híbrida (veure Figura 1.6). Es tracta d'un acceleròmetre uniaxial amb lectura capacitiva. El xip superior només conté un cantilever de polisilici que constitueix l'elèctrode superior. El xip inferior conté els elèctrodes inferiors per a la mesura capacitiva, i un circuit ASIC. La unió dels dos xips es realitza a través de soldadura eutèctica. En aquest cas la unió de la soldadura només serveix com a suport mecànic i protecció i no realitza contacte elèctric. La simplicitat dels seu disseny li aporta un elevat rendiment de producció [20].

### 1.3 Objectiu de la Tesi.

L'objectiu d'aquest treball titulat "*Un nou encapsulat multixip per a acceleròmetres piezoresistius*" és la compatibilització de dues tecnologies estàndard i amb forta implantació dins el camp microelectrònic. D'una banda la tecnologia de fabricació d'acceleròmetres piezoresistius amb tècniques de micromecanització sobre oblies BESOI, i per l'altre la tecnologia de mòduls multixip sobre substrats de silici.

Dues motivacions hi havia darrere aquest projecte. En primer lloc, el disseny d'un encapsulat robust i hermètic per aquests tipus de dispositius amb estructures mòbils i sensibles als esforços mecànics. Els requisits de l'encapsulat eren que no afectés al comportament elèctric del dispositiu i que facilités la manipulació del sensor en les etapes d'encapsulat i muntatge subseqüents. El desenvolupament d'encapsulats per sensors sol ser

molt específic i per tant molt costós. Sovint l'encapsulat pot arribar a representar fins al 70% del cost del dispositiu. El fet de utilitzar tecnologies d'encapsulat, com la de mòduls multixip, que ja són estàndards pels circuits integrats i desenvolupar-les o adaptar-les als requeriments dels sensors, pot ajudar a reduir els costos i el temps de desenvolupament.

El segon objectiu treia avantatge de la possibilitat d'incorporació de l'electrònica als substrats multixip i per tant aquest treball obre el camp al disseny de Sensors Intel·ligents o *Smart Sensors*. Els acceleròmetres piezoresistius són un dels dispositius MEMS amb més projecció de mercat. En algunes aplicacions com són la navegació, les aplicacions biomèdiques o els inclinòmetres, es treballa en un rang baix d'acceleracions de fins a  $\pm 2g$ . Les especificacions que ens vàrem imposar per la realització d'aquest treball han estat la fabricació d'un acceleròmetre de baix rang, d'elevada sensibilitat i alta resolució i amb un funcionament previst en DC. Degut al baix nivell de senyal que proporcionen aquests dispositius, la incorporació d'una etapa d'amplificació el més pròxim possible al sensor resulta molt interessant.

## 1.4 Organització de la Tesi.

Al capítol 2 d'aquesta memòria es fa una presentació en profunditat de les dues tecnologies estàndard CNM implementades en aquest treball. Per una banda la tecnologia de sensors piezoresistius sobre oblies BESOI, i per l'altre la tecnologia de mòduls multixip sobre substrat de silici. S'exposa el principi de funcionament dels sensors piezoresistius dissenyats en aquest treball i es donen exemples d'algunes de les aplicacions més interessants tant dels acceleròmetres com dels mòduls multixip.

El capítol 3 està exclusivament dedicat al disseny del mòdul multixip i als estudis previs realitzats sobre els sensors i sobre la seva compatibilitat amb el muntatge *flip-chip*. Les sensibilitats i el rang de treball dels acceleròmetres, entre d'altres paràmetres, es van ajustar mitjançant simulacions amb el programa d'elements finits ANSYS. Es descriu també el disseny dels dos substrats multixip implementats: el substrat de test i el substrat CMOS on s'ha inclòs una etapa pre-amplificadora i elements de correcció de l'offset. El comportament termo-mecànic de l'encapsulat *flip-chip* ha estat estudiat mitjançant simulacions FEM i els seus resultats s'han incorporat a l'etapa de disseny per tal de reduir al mínim els seus efectes sobre els acceleròmetres piezoresistius.

El procés final de fabricació dels sensors juntament amb les modificacions afegides per tal d'adaptar-lo al muntatge MCM, es descriuen al capítol 4. S'expliquen les diferents etapes del procés del muntatge *flip-chip*: el posicionament del sensor, el procés de refosa de la pasta de soldadura i el muntatge sobre una base d'encapsulat. Es comenten els problemes que han aparegut amb la nova tècnica d'encapsulat proposada i com s'han solucionat.

S'ha dut a terme una caracterització exhaustiva dels dispositius encapsulats individualment i en muntatge multixip, a fi i efecte de comparar-ne els resultats. També s'ha realitzat un estudi de l'estrès aportat per l'encapsulat a través de la mesura de les estructures de test dissenyades al sensor per a aquest efecte. Els resultats d'aquests estudis es discuteixen al capítol 5.

Les conclusions d'aquest treball s'exposen al capítol 6.

Als annexes A, B i C s'exposen la teoria piezoresistiva del silici emprada pel disseny dels sensors d'acceleració, la totalitat de les etapes de procés per a la fabricació d'un acceleròmetre adaptat al muntatge *flip-chip* i els esquemes dels diferents blocs que conformen el substrat intel·ligent dissenyat per a la lectura del sensor.

## 1.5 Referències.

- [1] Nexus. *Nexus MST Market Analysis 2002: Executive summary* [en línia]. [s.l.]: Nexus. [Consultat: 21 novembre 2002]. Disponible a Internet: [http://www.nexus-mems.com/documents/mst\\_executive\\_summary.doc](http://www.nexus-mems.com/documents/mst_executive_summary.doc)
- [2] R. Frank; M.L. Kniffin; Lj. Ristic, (1994) *Packaging for Sensors*, En: Ljubisa Ristic (ed.), *Sensor technology and devices*. Boston: Artech House. p. 203-238. ISBN 0-89006-532-2.
- [3] A. P. Malshe, C. O'Neal, S. B. Singh, (1999) *Challenges in the Packaging of MEMS*, The Int. Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, vol. 22, nº 3, pp. 223-241.
- [4] H. Reichl, (1991) *Packaging and Interconnection of Sensors*, Sensors and Actuators A, vol. 25-27, pp. 63-71.
- [5] R.R. Tummala, E.J. Rymaszewski (eds.), (1989) *Microelectronics Packaging Handbook*. New York : Van Nostrand Reinhold. ISBN 0-442-20578-3
- [6] L. Liwei, R.T. Howe, A. P. Pisano, (1998) *Microelectromechanical Filters for Signal Processing*, IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, pp. 286-294.
- [7] H. Krassow, (1999) *Microsensor Packaging for Flow Measurement with a Novel Differential Pressure Meter*. Tesi doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, Facultat de Ciències.
- [8] TRONIC'S Microsystems SA.( 2002). *Packaging and interconnections* [en línia]. Grenoble: TRONIC'S Microsystems. [Consultat: 21 novembre 2002]. Disponible a Internet: <http://www.tronics-mst.com/packaging.html>
- [9] A. Bossche et al., (1997) *Low-cost Reliable Transfer Mould Sensor Packaging Concept*, SPIE Symposium on Micromachined Devices and Components III, pp. 153-160.
- [10] V. Dhuler et al., *Characterization Study of Flip-Chip Integration for MEMS*, SPIE Proceedings vol. 2722, pp. 178-188.
- [11] H.H. Oppermann et al., (2000) *Advanced Flip-chip Technologies in RF, Microwave and MEMS Applications*, Design, Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, Proc. of SPIE, vol. 4019, pp. 308-314.
- [12] J. Kim et al., (2000) *Integration and Packaging of MEMS Relays*, Design, Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, Proc. of SPIE, vol. 4019, pp. 333-341.
- [13] H.A.C. Tilmans et al., (1999) *A Fully-Packaged Electromagnetic Microrelay*, 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'99, Orlando, Florida, pp. 25-30.
- [14] K.F. Harsh et al., (2000) *The Realization and Design Considerations of a Flip-Chip Integrated MEMS Tunable Capacitor*, Sensors and Actuators, vol. 80, pp. 108-118.

- [15] F. Mayer et al., (1998) *Flip-chip Packaging for Smart MEMS*, SPIE Conference on Smart Electronics and MEMS, pp. 183-193.
- [16] M.J. Scott, (1995) *Process Sensing and Control*, En: W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel (eds.). *Sensors: a comprehensive survey*. Weinheim [etc.] : VCH. vol. 8, p. 413-430. ISBN 3-527-26774-3 (v. 8).
- [17] H. Seidel, U. Fritsch, R. Gottinger and J. Schalk, (1995) *A Piezoresistive Accelerometer with Monolithically Integrated CMOS circuitry*, Tech. Digest of Transducers'95, pp. 597-600.
- [18] Analog Devices, Inc. (2002). *iMEMS® Accelerometers* [en línia]. Norwood, MA: Analog Devices. [Consultat: 21 novembre 2002]. Disponible a Internet: <http://www.analogdevices.com/technology/mems/accelerometers/index>.
- [19] J. T. Butler et al., (1998) *Adapting Multichip Module Foundries for MEMS Packaging*, Int. Conf. on Multichip Module and High Density Packaging, pp. 106-111.
- [20] M. Brandl, V. Kempe, (2001) *High Performance Accelerometer Based on CMOS Technologies with Low Cost Add-Ons*, The 14<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2001, pp. 6-9.



## Capítol 2 . Tecnologies implementades

El punt de partida pel desenvolupament d'un encapsulat multixip per un acceleròmetre ha estat dues tecnologies ja existents al CNM: la tecnologia de fabricació d'acceleròmetres piezoresistius basats en oblies BESOI i la de mòduls multixip de tipus-D, abreujadament MCM-D. Totes dues tecnologies han adquirit el grau d'estàndard al CNM, el seu comportament ve avalat per un gran nombre de treballs i les seves característiques tant elèctriques, mecàniques com tèrmiques han estat àmpliament estudiades [1], [2], [3].

La tecnologia de fabricació d'acceleròmetres piezoresistius està basada en la combinació de micromecanitzat en volum i en superfície d'oblies BESOI. Les característiques més destacades d'aquesta tecnologia són la simplificació de l'aturada del gravat anisòtrop, la definició d'estructures de protecció contra xocs, i, per últim, la soldadura anòdica vidre-silici. Els dispositius fabricats amb aquesta tecnologia presenten una elevada regularitat en les seves característiques elèctriques i una provada robustesa.

Els mòduls multixip de tipus-D del CNM, són encapsulats 3D sobre substrat de silici, que empren la tècnica coneguda com a *flip-chip* pel muntatge i la interconnexió elèctrica xip-substrat. La tecnologia de fabricació dels mòduls multixip ens permet disposar de substrats de silici de fins a quatre nivells de metall per aplicacions amb una elevada densitat d'interconnexió, així com incloure dispositius CMOS o de potència per aplicacions d'alt nivell. Això és possible gràcies al material emprat com a dielèctric entre els diferents metalls: la poliimida. Aquest material té una bona capacitat de recobriment de graons

abruptes i, per tant, de planarització. Paral·lelament, l'arquitectura *flip-chip* permet el muntatge de xips fabricats en tecnologies diferents, mentre que distribució en àrea dels pads d'interconnexió permet un estalvi en consum d'àrea de silici, respecte d'altres tècniques d'encapsulat.

A continuació es descriuen en profunditat aquestes dues tecnologies estàndard, a la vegada que es donen els principis bàsics de funcionament dels sensors que s'han inclòs en aquest treball.

## 2.1 Tecnologia de sensors d'acceleració.

El silici, a més de ser un perfecte material semiconductor, és molt dur i lleuger, cosa que el fa un material òptim per la seva mecanització. La introducció del silici i l'aplicació de tècniques microelectròniques en la fabricació de microestructures va donar lloc al naixement dels sensors i actuadors micromecànics o *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Això va permetre un gran creixement del mercat d'aquest tipus de dispositius ja que els va fer barats i de producció en massa.

Es pot dir que no hi ha pràcticament cap àrea d'estudi en que no hi trobem la presència de microsensors amb aplicacions en el transport, el control de processos, la medicina i d'altres. Així podem trobar sensors físics com els de pressió, temperatura o acceleració; químics com els de pH, pK, o de gasos; sensors de radiació, etc. Actualment els sensor de pressió i els d'acceleració són els més comercials.

Els sensors d'acceleració, o acceleròmetres, es classifiquen dins el grup de sensors mecànics, i el seu principi de detecció està basat bé en la mesura d'un desplaçament, bé en la mesura d'esforços mecànics. Dues de les aproximacions que han tingut més rellevància en el disseny dels acceleròmetres de silici han estat la mesura capacitiva i la mesura piezoresistiva. Als sensors capacitius, el principi de funcionament és la detecció de la variació d'una capacitat que té un dels dos elèctrodes mòbils i que es desplaça en presència de l'acceleració. En els acceleròmetres piezoresistius es mesura el canvi en la piezoresistivitat del silici provocada pels esforços mecànics. Les característiques més importants d'aquestes dues famílies de sensors es resumeixen a la Taula 2.1:

Paràmetre	Capacitius	Piezoresistius
<b>Impedància</b>	Alta	Baixa
<b>Dependència temperatura</b>	Baixa	Alta
<b>Linealitat</b>	Mitjana	Alta
<b>Resposta en freqüència</b>	Baixa	Mitjana
<b>Sensibilitat</b>	Alta	Mitjana
<b>Electrònica</b>	Necessària	No necessària

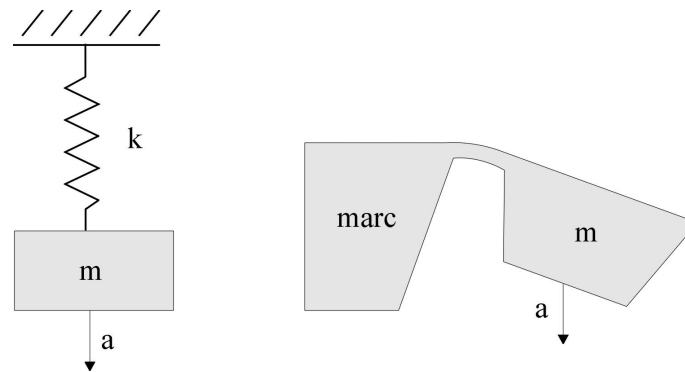
**Taula 2.1: Taula comparativa de les dues principals tecnologies de fabricació d'acceleròmetres.**

Com s'extreu de la Taula 2.1, els dos principis de funcionament presenten tan avantatges i desavantatges. L'elecció d'un tipus o d'un altre dependrà de l'aplicació i de la tecnologia disponible per a la seva fabricació. Generalment, els acceleròmetres capacitius s'empren en la detecció d'acceleracions elevades d'entre 10-50g [4], mentre que les aplicacions preferides dels piezoresistius són les de baixa acceleració, entre 1-2g. En la fabricació dels sensors capacitius s'utilitza, principalment, la tècnica de micromecanitzat superficial per a la definició dels elèctrodes, enfront dels piezoresistius que necessiten del micromecanitzat en volum per crear estructures tridimensionals amb una gran massa. La impedància de les piezoresistències implementades als sensors piezoresistius és molt més baixa que la impedància capacitiva que presenten els sensors capacitius. La resposta dels piezoresistius és molt lineal davant l'acceleració, però per altre banda són molt sensibles a la temperatura degut a la dependència de la piezoresistivitat amb la temperatura. Un dels problemes de l'aproximació capacitiva, el trobem en les capacitats paràsites de l'encapsulat i de les connexions, en ocasions més grans que la variació que es pretén mesurar emmascarant així la mesura. Això fa necessari que l'electrònica de lectura estigui monolíticament integrada al sensor.

Amb això, hem volgut remarcar l'existència de diferents tecnologies per a la fabricació de microacceleròmetres en silici i constatar que, en el marc de la nostra aplicació, la utilització de sensors piezoresistius és la més adequada. A partir d'ara, en aquesta memòria, només es parlarà d'acceleròmetres piezoresistius fabricats sobre oblees BESOI. Abans, però, de parlar de la tecnologia es descriu el tipus de sensor que es vol fabricar i el seu principi de funcionament.

### 2.1.1 *Principi d'operació dels acceleròmetres piezoresistius.*

Els acceleròmetres piezoresistius són sensors d'acceleració que es basen en una propietat física del silici: la piezoresistivitat [5]. L'efecte piezoresistiu consisteix en la variació de la resistència del material quan aquest es sotmès a esforços mecànics. Així doncs, en el disseny d'un acceleròmetre piezoresistiu es busca una relació directa entre la quantitat a mesurar, l'acceleració, i els esforços mecànics. Gràcies a la característica de material elàstic del silici, el disseny d'aquests dispositius tenen com a principi de funcionament el sistema massa-molla. Aquest sistema ve descrit per la llei de Hooke, de manera que quan s'aplica una certa acceleració a la massa aquesta és desplaça i provoca una elongació a la molla proporcional a la constant elàstica de la molla. A la Figura 2.1 es mostra l'equivalència entre el disseny del acceleròmetre i el sistema massa-molla. En aquesta figura,  $m$  és la massa del dispositiu,  $a$  és l'acceleració aplicada i  $k$  és la constant elàstica de la molla.



**Figura 2.1: Equivalència de l'estructura física de l'acceleròmetre amb un sistema massa-molla.**

El disseny que es mostra a la Figura 2.1 és el d'un acceleròmetre tipus *cantilever*, però el seu principi d'operació pot ser aplicat a la resta de dissenys. Com es veu, la massa és un bloc de silici d'aproximadament el gruix de la oblea, mentre que la molla és un pont prim ancorat al marc de l'estructura. Quan la massa és sotmesa a una acceleració, pateix una força proporcional a aquesta i per tant un desplaçament. Aquest desplaçament de la massa provoca esforços mecànics en el punt d'ancoratge, és a dir, al pont. Aquest es construeix molt prim, de manera que els estressos en aquesta regió siguin més importants. És en aquesta zona, doncs, on es col·loquen les resistències sensores, o piezoresistències, per tal d'obtenir la màxima sensibilitat.

L'equivalència de l'estructura del sensor amb el model massa-molla permet extreure algunes relacions molt senzilles per aquests dispositius. De l'aplicació de la llei de Hooke i de la segona llei de Newton s'extreu que el desplaçament d'equilibri de la massa,  $x$ , és directament proporcional a l'acceleració que pateix.

$$x = a \cdot \frac{m}{k} \quad (2.1)$$

La sensibilitat, si bé depèn de la estructura física del sensor, és proporcional a aquest desplaçament, per tant, per obtenir una elevada sensibilitat sempre es buscaran estructures que es desplacin molt. El moviment que realitza el sistema massa-molla és un moviment harmònic simple amb una freqüència natural o de ressonància donada per la relació (2.2).

$$\omega_0 = (k/m)^{1/2} \quad (2.2)$$

La freqüència de ressonància limita el rang màxim d'operació en freqüència dels sensor, doncs a freqüències properes a la de ressonància la seva resposta no és lineal. De l'expressió (2.2) veiem que la freqüència de ressonància és inversament proporcional al factor  $(m/k)$  de manera que una més gran sensibilitat es tradueix en una més petita freqüència de ressonància, i per tant un rang d'operació més estret. Existeix, doncs, un compromís entre el valor de la sensibilitat i el seu rang d'operació en freqüència.

En un sistema real, però, existeix sempre l'amortiment, típicament degut a les forces de fricció amb el fluid que envolta el sensor, normalment l'aire. El valor de l'amortiment és un factor molt important en les característiques dinàmiques del sensor. Si no hi hagués amortiment es corre el risc de que el dispositiu entri en ressonància i eventualment s'arribi a

trencar, però un sobreamortiment limita el comportament en freqüència del dispositiu. En general, un cert grau d'amortiment sempre és desitjable per evitar la destrucció del component. Aquest paràmetre es controla mitjançant la viscositat del fluid en el que es pugui submergir l'acceleròmetre, o bé mitjançant la distància entre la massa i el seu encapsulat deixant només una estreta capa d'aire aprofitant l'efecte d'amortiment per capa comprimida d'aire[6].

Intentarem descriure el comportament d'un oscil·lador esmorteït fent-nos servir de nou del model massa-molla esmorteït. Una força esmorteïdora és una força de fricció que fa un treball negatiu contra el sistema. En primera aproximació, aquesta força és proporcional a la velocitat del moviment de la massa, tal i com s'expressa a l'equació (2.3):

$$F_a = -c\dot{x} \quad (2.3)$$

On  $c$  és l'anomenada constant d'amortiment i el signe menys indica que la força s'oposa al moviment. L'equació de segon grau que governa el moviment d'un sistema esmorteït és la (2.4):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = ma \quad (2.4)$$

L'equació (2.4) es pot rescriure d'una forma més adient com:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2.5)$$

A l'equació (2.5) trobem de nou la definició de la freqüència de ressonància i un nou paràmetre anomenat coeficient d'amortiment,  $\beta$ , que es defineix com:

$$\beta = \frac{c}{2m} \quad (2.6)$$

L'equació (2.5) no té una solució única sinó que la solució depèn dels valors concrets dels paràmetres  $\beta$  i  $\omega_0$ . Examinem breument cadascun d'aquests casos.

- Cas  $\beta < \omega_0$ : L'amortiment rep el nom **d'amortiment feble**. L'amplitud del senyal decreix exponencialment amb el temps i la freqüència de ressonància del sistema es veu modificada segons el valor del coeficient d'amortiment. Es defineix la freqüència angular d'amortiment com:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (2.7)$$

- Cas  $\beta \approx \omega_0$ : **Amortiment crític**. En aquesta situació segons l'expressió (2.7)  $\omega \approx 0$ , i per tant no hi ha oscil·lacions. El sistema torna a la posició d'equilibri passant només un

cop pel màxim d'amplitud. Al valor  $\beta=\omega_0$  se l'anomena coeficient d'amortiment crític.

- Cas  $\beta>\omega_0$ : **Sobre amortiment**. El sistema torna a la posició d'equilibri molt ràpidament. El rang de freqüències d'operació del dispositiu es veu molt reduït.

El factor de qualitat, **Q**, es defineix com la raó entre l'amplitud de la resposta del sensor a la freqüència de ressonància i l'amplitud a baixes freqüències. Aquest paràmetre s'extreu de la caracterització dinàmica del sensor i proporciona molta informació sobre el seu comportament en freqüències properes a la de ressonància. Per la situació d'amortiment feble Q ve donat per l'equació:

$$Q = \frac{\sqrt{k \cdot m}}{c} \quad (2.8)$$

D'aquesta relació es veu que una situació de sobre amortiment (c gran) es correspon a una Q petita, però per un amortiment feble, Q és gran i el pic de la freqüència de ressonància es alt i estret.

#### □ Les piezoresistències.

La característica de piezoresistivitat del silici depèn del nivell i tipus de dopatge (veure Annex A), i es mesura segons l'anomenat factor de galga, que relaciona la variació de la resistència amb l'estrès. Un semiconductor tipus p té un factor de galga més important que un de tipus n, i per això gairebé totes les piezoresistències es fabriquen de tipus p. Així doncs, en el nostre cas, es defineixen regions de tipus p sobre substrat de tipus n. A aquestes regions se les anomena *piezoresistències*. Les piezoresistències, quan sotmeses a esforços o estrès mecànic, canvien el seu valor depenent del signe del coeficient piezoresistiu i del tipus d'esforç, si és compressiu o tensor i si aquest s'aplica de forma longitudinal o transversal al sentit del corrent a la piezoresistència. A l'annex A es demostra que la variació de les piezoresistències, suposant que els estressos longitudinals i transversals siguin constants tot al llarg de la resistència, és la que es recull a l'equació (2.9):

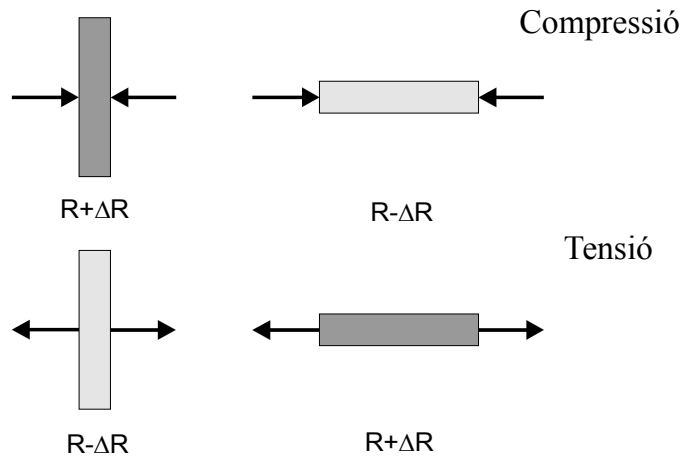
$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.9)$$

On  $\pi_l$  i  $\pi_t$  són els anomenats coeficients piezoresistius en les direccions longitudinal i transversal i  $\sigma_l$  i  $\sigma_t$  els estressos. Per a piezoresistències tipus p orientades en la direcció  $\langle 110 \rangle$  en una oblia (100) la relació (2.9) es pot aproximar per:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \quad (2.10)$$

Abans hem comentat que la piezoresistivitat, i per tant els coeficients piezoresistius depenen del dopatge. Les piezoresistències es realitzen per implantació iònica i el perfil de dopatge després de l'activació d'impureses és tal que es poden considerar les piezoresistències com una capa prima. Per tant, els valor dels coeficients piezoresistius emprats en les expressions (2.9) i (2.10) serà el corresponent a la concentració superficial

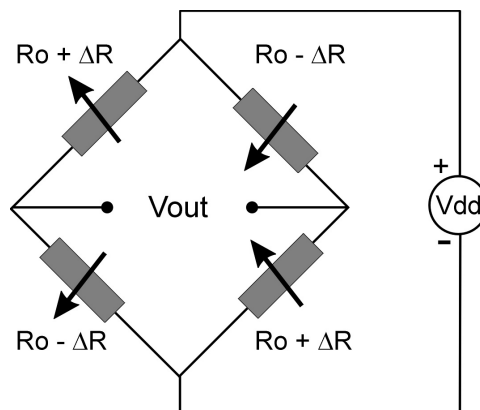
d'impureses. La Figura 2.2 mostra el comportament d'una piezoresistència tipus p quan sotmesa a esforços mecànics depenent del signe (positius per a la tensió i negatius per a la compressió) i la direcció dels esforços aplicats.



**Figura 2.2:** Variacions dels valor de les piezoresistències tipus p, quan sotmeses a esforços tensius o compressius.

□ **Pont de *Wheatstone*.**

Els valors d'esforços mecànics que es solen aconseguir amb dissenys mecànics basats en aquest principi solen donar variacions en el valor de les resistències de l'ordre de 1 per mil o inferiors. Aquests canvis són difícilment detectables per una sola resistència i per tant en aquest tipus de sensors es solen implementar quatre piezoresistències en forma de pont de *Wheatstone*. Les piezoresistències s'orienten de manera que dues d'elles percebin l'estrès en la direcció del corrent i les altres dues perpendiculars a la direcció del corrent. D'aquesta manera quan s'aplica una acceleració dues d'elles augmenten de valor i les altres dues disminueixen, tal i com es veu a la Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Esquema d'un pont de *Wheatstone*.

El pont de *Wheatstone* és pot alimentar en tensió o en corrent. Suposant que les resistències estan perfectament aparellades, quan s'alimenta amb una tensió  $V_{dd}$  l'expressió per la sortida del pont és senzillament:

$$V_{out} = V_{dd} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} \quad (2.11)$$

Així un canvi en les resistències es tradueix directament en una tensió de sortida. Si es defineix la sensibilitat com la variació relativa de la tensió de sortida per unitat d'acceleració, per un pont alimentat a tensió constant tenim:

$$S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta g} \cdot \frac{1}{V_{dd}} = \frac{\Delta R}{\Delta g} \cdot \frac{1}{R_0} \quad (2.12)$$

Així doncs, a tensió constant, la sensibilitat del pont depèn exclusivament de la variació relativa de les piezoresistències, cosa que proporciona una bona repetitivitat en els valors de sensibilitat.

El pont de *Wheatstone* pot donar problemes d'offset degut a les diferències de valor nominal de les piezoresistències que el formen. Aquestes diferències provenen de la inhomogeneïtat del procés de fabricació. Per evitar-ho, durant l'etapa de disseny de les piezoresistències, aquestes es situen el més proper possible les unes de les altres. Un altre factor causant d'offset és la presència d'estressos inicials degut als processos de fabricació de la oblea. Aquest factor s'ha vist molt reduït a partir de la utilització per d'oblies BESOI, en comptes de capes dipositades.

El pont de *Wheatstone* també es pot alimentar amb corrent constant. Aquesta tècnica s'empra per compensar en primer ordre la variació amb temperatura del pont, però presenta el problema de que la sensibilitat depèn del valor absolut de les piezoresistències i no de la seva variació relativa com en el cas d'alimentació a tensió constant.

### 2.1.2 Tecnologia de fabricació d'acceleròmetres piezoresistius.

La tecnologia de fabricació de les microestructures que hem vist a l'apartat 2.1.1, se'n diu micromecanitzat. El gran avenç que han experimentat els microsensors ha estat gràcies al desenvolupament d'aquesta tècnica. Les dues tècniques més importants són: la micromecanització en volum i la micromecanització superficial. A continuació descriurem totes dues tècniques i per últim la tècnica emprada en la fabricació dels nostres dispositius. Una tècnica basada en oblies BESOI que combina totes dues tècniques de micromecanitzat.

#### 2.1.2.1 Micromecanitzat en volum.

La micromecanització en volum estructura grans masses aprofitant tot l'espessor de l'oblia. Es basa en l'atac anisòtrop, amb KOH o TMAH, del silici el qual presenta diferents velocitats d'atac pels diferents plans cristal·lins. La velocitat de gravat és més lenta als plans {111} i més ràpida als {100} i {110} [7]. Aquest gravat preferencial dels plans cristal·lins del silici crea cavitats amb les parets inclinades definides pels plans cristal·lins d'atac lent, tal i com es mostra a la Figura 2.4:





**Figura 2.4: Pareds del gravat anisòtrop per una obertura quadrada.**

Aquesta forma de gravat en V, fa que a nivell de màscara es necessiti un àrea extra per definir les estructures micromecanitzades. Aquest efecte indesitjat es pot solucionar emprant tècniques avançades d'atac per plasma del silici [8]. Un altre problema que presenta el gravat anisòtrop és el del sobre gravat de les zones convexes. Això requereix de la definició d'estructures de compensació per evitar aquest sobreatac [9]. Existeixen diferents tècniques per l'aturada del gravat anisòtrop. La més important és la que aprofita la selectivitat de l'atac segons els materials. Així s'aconsegueix aturar el gravat en creant capes enterrades d'òxid o zones fortament dopades. D'altres tècniques d'aturada són el control per temps o l'aturada electroquímica. Les masses que s'estructuren amb aquesta tècnica solen ser molt grans i per tant s'obtenen dispositius amb una sensibilitat elevada.

#### 2.1.2.2 Micromecanitzat superficial.

El micromecanitzat superficial es basa en el dipòsit o creixement de capes sacrificials, principalment polisilici, i capes estructurals (òxid de silici) per definir les estructures. Els dispositius fabricats amb aquesta tecnologia són en general més petits que els de micromecanització en volum, però el problema que han de superar és el la reproductibilitat de les capes primes i la seva estabilitat mecànica [10]. Habitualment, aquestes capes es dipositen per tècniques CVD i el control de les condicions de procés és molt important per evitar l'estrès residual d'aquests materials. Amb aquesta tecnologia es solen fabricar principalment acceleròmetres del tipus capacitiu on un dels elèctrodes és de tipus cantilever. En general, aquesta tecnologia és més aconsellable per fer *Smart Sensors*, doncs els processos de micromecanitzat superficial són més compatibles amb tecnologies microelectròniques de fabricació de circuiteria que els processos de micromecanitzat en volum.

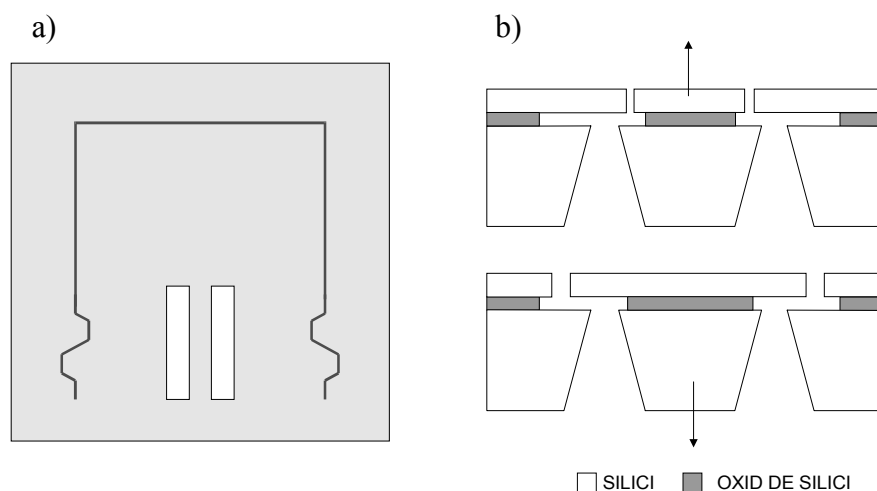
#### 2.1.2.3 Micromecanitzat sobre oblies BESOI.

La tecnologia de fabricació d'acceleròmetres del CNM es basa en una combinació de les tecnologies de micromecanització en volum i superfície sobre oblies BESOI (*Bond and Etch Back Silicon on Insulator*). Aquestes oblies tenen tres regions, la regió de silici superficial d'entre 5 i 20 $\mu\text{m}$ , la regió d'òxid enterrat d'entre 1 a 10 $\mu\text{m}$  i la regió de silici bulk. La definició de les estructures es realitza mitjançant un atac anisòtrop amb KOH del bulk de la oblia amb aturada a la capa enterrada d'òxid. La capa de silici superficial es grava amb un

atac sec i d'aquesta manera s'alliberen les estructures. D'aquesta manera el control sobre el gruix dels ponts és molt precís doncs ve donat pel gruix de la capa de silici per sobre l'òxid. Aquesta tecnologia és més fiable i més versàtil que d'altres doncs evita problemes com el del sobreatac dels ponts o la utilització de màscares extres per a la definició de l'aturada electroquímica. L'existència de la capa d'òxid enterrat permet el disseny i fabricació d'estructures de protecció contra xocs tal i com expliquem a continuació.

□ **Estructures de protecció contra xocs.**

El disseny físic típic dels acceleròmetres, on una gran massa és subjectada per un pont prim i estret, els fa molt fràgils i febles davant de xocs, per exemple, una caiguda des d'un metre d'alçada pot suposar una acceleració de 1000g en impactar contra el terra. A més a més, aquesta fragilitat disminuïa molt el rendiment de la fabricació d'aquests dispositius fins a la implementació de mecanismes que limitaren el moviment de la massa. L'implementació de sistemes de protecció contra xocs, va fer possible la comercialització d'aquests dispositius al final dels anys 80. La tecnologia sobre oblies BESOI permet un disseny senzill d'aquestes estructures, també anomenades *Over-range protection systems*. Es tracta de definir unes aletes que parteixen del marc i arriben fins a la massa i a l'inrevés, que parteixen de la massa i es col·loquen fins al marc, tal i com es pot veure a la Figura 2.5. D'aquesta manera el recorregut màxim que se li permet a la massa és el gruix de la capa d'òxid enterrat, que en aquest cas ha estat emprada com a capa sacrificial, perquè a més de gravar tot el gruix és necessari un sobreatac lateral. Aquest sistema va ser proposat per LUCAS NOVASENSOR, però fent servir la soldadura directa de dues oblies en lloc d'oblies BESOI [11].



**Figura 2.5: Estructures de protecció contra xocs fabricades amb tecnologia BESOI, a) vista superior, b) vista lateral.**

□ **La soldadura anòdica.**

La soldadura anòdica silici-vidre (Pyrex #7740, HOYA SD-2) és una de les tècniques més importants en el camp d'encapsulat de MEMS. La seva utilització fa viable i comercialitzable la fabricació d'una gran part d'aquests dispositius. Després de la fabricació, la soldadura anòdica és el primer procés abans de l'encapsulat del sensor. El vidre o quars, és un material molt robust i fàcilment mecanitzable, proporciona protecció física i en molts

casos s'integra com a part del sensor, com en el cas de sensors de pressió i de gasos, on la soldadura anòdica permet crear cavitats hermètiques entre el silici i el vidre.

En el cas de la tecnologia estàndard d'acceleròmetres piezoresistius del CNM, el vidre es solda a la cara dors dels dispositius i és aquest el que s'enganxa, mitjançant epoxies o adhesius, a les bases d'encapsulat. Els acceleròmetres són dispositius sensibles als esforços i a l'estrès, i per tant els esforços provinents de l'encapsulat poden fer variar la sortida del sensor sense una acceleració aplicada, és a dir, es traduirien en un offset. En aquesta configuració el vidre és l'encarregat d'absorbir part dels esforços que li transmet l'encapsulat i evitar que arribin al dispositiu. Un altre avantatge que aporta, és el fet de tenir un coeficient d'expansió tèrmic, CTE, molt semblant al del silici. Això fa que els estressos termo-mecànics derivats de les variacions de temperatura siguin molt inferiors.

La soldadura anòdica va ser descoberta a l'any 1969 per G. Wallis and D. L. Pomerantz [12]. En microelectrònica, la soldadura anòdica silici-vidre és un procés que es realitza a temperatures d'entre 250 i 400°C a la vegada que s'aplica una elevada tensió entre el vidre i el silici. Aquest procés dona com a resultat una soldadura d'elevada qualitat entre els dos materials. A continuació descrivim breument aquest procés estàndard de la tecnologia CNM. L'equip de soldadura del que disposa el centre és un PLASMOS FAB150. Les oblies polides de silici i vidre es posen en contacte directe sobre una placa calefactora, el silici en contacte amb la placa. Per obtenir una soldadura de bona qualitat és requereix que la rugositat de les superfícies sigui inferior a 2  $\mu\text{m}$ . La placa calefactora juga a la vegada el paper d'ànode, mentre que el càtode es col·loca sobre l'oblia de vidre. Aquest càtode té forma d'estrella per tal que la tensió que cau sobre el vidre sigui el més uniforme possible evitant a la vegada la formació de cavitats sense soldar [13]. Aquestes cavitats es formen quan la soldadura comença a varis punts a la vegada i deixa zones amb aire atrapat. Amb un elèctrode en forma d'estrella la soldadura comença des del centre fins als extrems de forma radial i per tant és més difícil que diferents fronts de soldadura convergeixin. La Figura 2.6 és un dibuix del muntatge per a dur a terme la soldadura anòdica.

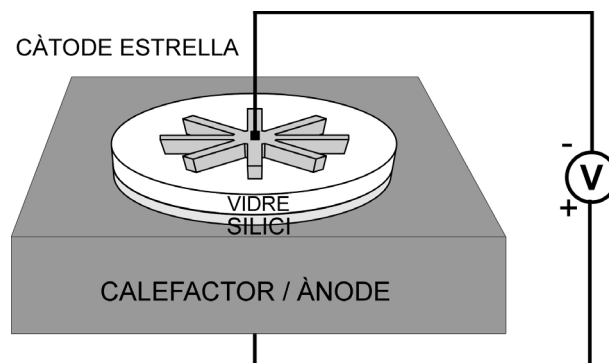


Figura 2.6: Equip pel procés de la soldadura anòdica.

Un cop fet el muntatge s'escalfa el conjunt a una temperatura d'aproximadament 400°C. A aquesta temperatura s'aplica una tensió al voltant de 1000V. La naturalesa del procés de la soldadura no és encara totalment coneguda. En ell es barregen tant fenòmens físics com químics però es basa en una forta depleció d'ions a la interfície vidre-silici, la qual crea un elevat camp electrostàtic que posa en contacte íntim les dues superfícies.

### 2.1.3 Aplicacions dels acceleròmetres piezoresistius.

Els acceleròmetres han trobat camp d'aplicació en àrees molt diverses de la indústria (veure Taula 2.2). L'arribada a la maduresa de la tecnologia, amb el disseny de l'encapsulat apropiat i les estructures de protecció contra xocs, va permetre la incorporació d'aquests sensors a la indústria de la automoció, camp que en la actualitat és el més important per aquest tipus de dispositius. Acceleròmetres amb un rang d'operació de fins a 50g, són emprats per als airbags, mentre que les aplicacions de baixa g són les relacionades amb la conducció del vehicle: control de la direcció, suspensió activa i com a inclinòmetre. Les especificacions típiques d'aquests acceleròmetres són un rang de treball de fins a  $\pm 2g$ , una sortida ratiomètrica, un ample de banda de treball de com a mínim 50Hz i la sensibilitat creuada per sota del 3% i una no-linealitat per sota de l'1% [14], [15]. En les aplicacions d'automoció es un requisit imprescindible que el xip tingui una bona robustesa i fortalesa davant els xocs mecànics de fins a 1000g.

Camp d'aplicació	Aplicacions
Automoció	Suspensió activa Frenada ABS Sensor de col·lisió pel sistema Airbag.
Aeroespacial	Navegació amb giròscops
Mèdica	Control del moviment i posició del cos.
Geologia	Sismògrafs

**Taula 2.2: Aplicacions més importants pels acceleròmetres piezoresistius.**

Els acceleròmetres triaxials estan començant a ésser emprats a la medicina pel control del moviment del cos. Les especificacions per aquesta aplicació són un rang de fins a  $\pm 5g$ , funcionament en DC, i sensibilitat creuada inferior al 5%, a més d'una mida petita i un consum inferior al 1mW [16]. En les aplicacions aeroespacials els requisits són una alta estabilitat, així com un baix soroll i baixa deriva amb la temperatura.

## 2.2 Tecnologia de mòduls multixip.

Un mòdul multixip es podria definir com un encapsulat d'alt nivell que inclou dos o més xips sobre un substrat comú. Les característiques bàsiques que ofereix aquest tipus d'encapsulat són una reducció de la llargària de les interconnexions, amb la conseqüent millora en el comportament elèctric, un aprofitament més elevat de l'àrea i un major nombre disponible de I/O's. A aquests avantatges s'afegeix la demanda de la indústria per l'abaratiment dels costos del procés d'encapsulat, que en el cas de sistemes complexos amb un nombre elevat de components discrets, poden arribar a superar el 30% del cost global del producte. Totes aquestes raons van portar a que es desenvolupés ràpidament un ampli ventall de solucions pel concepte d'encapsulat multixip. Actualment dins d'aquesta definició s'hi encabeixen diferents tipus de substrats així com diferents tècniques de muntatge, les quals van des del *wire-bonding* convencional, passant pel *Tape Automated Bonding (TAB)* fins al *flip-chip*.

Els mòduls multixip són l'evolució natural dels circuits híbrids de *thick-film*, en els quals ja es combinava el muntatge d'elements discrets amb dispositius sense encapsular, els anomenats *bare dice*. En els primers circuits híbrids el material més utilitzat com a substrat era la ceràmica, i posteriorment es van anar introduint els laminats i, finalment, els substrats de silici. Actualment, la classificació dels mòduls multixip es fa en base al tipus de substrat utilitzat en cada cas. Així podem parlar clarament de quatre grups:

- ❑ MCM-C: S'utilitzen tècniques de *thick-film* per definir pistes de connexió, normalment de coure sobre substrats ceràmics.
- ❑ MCM-L: Substrats PWB multicapa, d'alta tecnologia i elevada densitat d'interconnexió.
- ❑ MCM-D: Tècniques de dipòsit *thin-film* de metalls i materials dielèctrics sobre substrats de silici, vidre o ceràmica.

La característica comuna d'aquests substrats és la seva condició de multicapa per tal de proporcionar la necessària densitat d'interconnexió entre els xips que hi van muntats. L'elecció d'una o altra tecnologia per a una aplicació concreta, dependrà dels requeriments elèctrics i tèrmics de l'aplicació, així com dels costos de fabricació d'aquesta. La Taula 2.3 mostra les característiques més rellevants i diferenciadores dels tres tipus més importants de mòduls multixip.

	<b>MCM-L</b>	<b>MCM-C</b>	<b>MCM-D</b>
<b>Substrat</b>	Printed Wiring Boards	Cofired Ceramics	Silici
<b>Material dielèctric</b>	Epoxy glass	Alumina	Poliimida
<b>Constant dielèctrica</b>	2.8-4.5	4.5-10	2.6-4
<b>Dissipació tèrmica</b>	Baixa-mitjana	Alta	Moderada
<b>Densitat d'interconnexió</b>	Baixa	Moderada	Alta
<b>Cost Fabricació</b>	Baix	Moderat	Alt

**Taula 2.3:** Taula amb les dades més rellevants per als tres tipus més importants de categories de MCM.

La tecnologia d'encapsulat dels mòduls multixip aconsegueix una més gran eficiència, que els encapsulats tradicionals, tant en densitat d'espai, com en comportament elèctric. Les connexions en un mòdul multixip són internes, és a dir xip-substrat-xip, i per tant més curtes que les connexions fil-substrat-fil entre discrets d'un PCB i protegides de l'ambient per l'encapsulat del mòdul. Aquest tipus de connexions ha permès la reducció de les inductàncies paràsites associades a l'encapsulat, a la vegada que s'ha incrementat la fiabilitat i la qualitat d'aquestes interconnexions.

### 2.2.1 MCM-D: Mòduls Multixip de substrat de silici.

La tecnologia existent al CNM per a la fabricació de mòduls multixip és l'anomenada de tipus-D (MCM-D). Aquest nom prové de l'anglès *Deposited* i fa referència a l'ús de tècniques de tecnologia microelectrònica en el processat dels substrats de silici. Precisament, els avantatges de fer servir una tecnologia basada en silici, són les diferents variants de

substrat que ens ofereix. En concret es pot utilitzar un substrat, no només amb línies d'interconnexió o dispositius passius integrats, sinó que també s'hi poden incorporar elements actius. Aquesta última variant és, sens dubte, la que ofereix una densitat d'integració més elevada [17].

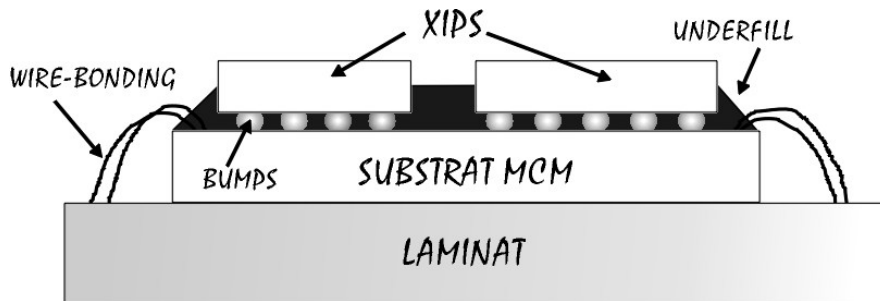


Figura 2.7: Esquema de l'arquitectura d'un mòdul multixip de tipus D.

La tècnica de muntatge dels xips és la coneguda com a *flip-chip*, on els xips es munten cara avall i es solden amb boles de soldadura sobre el substrat, tal i com es veu a la Figura 2.7. Els xips que han d'anar sobre el substrat poden ser xips de qualsevol tecnologia o, fins i tot, comercials sempre i quan la matriu de pads hi coincideixi amb la del substrat. En el cas de xips comercials, el procés de modificació dels pads perifèrics per una matriu de pads s'anomena *rerouting*. A continuació es diposita el material de soldadura sobre els *bump pads* del substrat i es munten els xips cara-avall. Després tot el conjunt es sotmès al procés de recuita del material de soldadura, durant la qual es formen les connexions elèctriques entre el substrat i els *flip-chips*. El mòdul multixip s'omple amb un material orgànic, genèricament anomenat *underfill*, el qual millora la fiabilitat i la fatiga tèrmica d'aquestes connexions. Per últim, el mòdul es munta sobre un altre substrat i es realitzen les connexions elèctriques necessàries cap al mòdul mitjançant *wire-bonding*.

La tecnologia multixip sobre silici és una de les més adequades pel tractament de la dissipació de el calor. Per una banda la tècnica *flip-chip* deixa la cara posterior del xip accessible per a l'evacuació de calor, i per altre banda el muntatge sobre substrat de silici minimitza els problemes de dilatació tèrmica dins el muntatge, al no existir diferència entre els coeficients d'expansió tèrmica (CTE) dels materials del mòdul.

### 2.2.2 Arquitectura dels mòduls multixip.

En el desenvolupament d'un sistema o d'un mòdul multixip es succeeixen diferents etapes d'encapsulat que aniran adaptant el circuit electrònic individual al sistema final. Ens estem referint des de la passivació del circuit integrat, fins la seva instal·lació en un sistema complet, com podria ser una placa mare en un PC qualsevol. Aquest seguit d'etapes successives es poden dividir en diferents nivells [18].

- Nivell 0: Comprèn els diferents metalls d'interconnexió entre els dispositius d'un mateix xip i la passivació final del conjunt.
- Nivell 1: És el muntatge del xip sobre un suport mecànic adient, amb connexions elèctriques fiables.
- Nivell 2: És la connexió de l'encapsulat de nivell 1 amb d'altres similars.
- .....

A partir d'ara ens referirem a les diferents etapes de fabricació d'un mòdul multixip seguint l'anterior esquema o nomenclatura.

➤ **Encapsulat de nivell 0: El xip.**

Aquest nivell d'encapsulat és, segons alguns autors, part de la fabricació d'un circuit integrat. Podríem dir que és la interconnexió dels dispositius que formen l'IC i a més la passivació de protecció al damunt de tot el xip. En el cas de la tecnologia MCM hem d'incloure en aquest nivell, la fabricació del propi substrat amb les capes alternants de metall i aïllant, juntament amb l'adequació dels pads estàndard d'alumini als requeriments del muntatge *flip-chip*. Aquesta adequació consisteix en el dipòsit d'un metall soldable amb l'aliatge metàl·lic de les boles de soldadura.

➤ **Encapsulat de primer nivell: el *Flip-Chip*.**

En un mòdul multixip el primer nivell d'encapsulat és la connexió inter-chip, és a dir, establir les connexions internes del mòdul abans d'extreure les connexions externes. A aquest nivell s'hi troben diverses tècniques de connexió elèctrica, entre les que destaca per la seva utilització a gran escala, el *Wire-Bonding*. D'altres menys conegudes com el TAB (*Tape Automated Bonding*) ó darrerament la del *Flip-Chip* (veure Figura 2.8), van guanyant importància degut a la seva característica de procés en sèrie, fet que millora la fiabilitat i els costos del procés [19]. Aquesta darrera és l'utilitzada pel CNM en la fabricació dels mòduls multixip i és la que passarem a descriure a continuació.

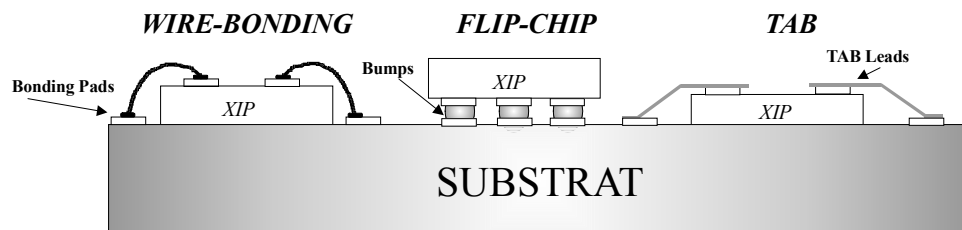
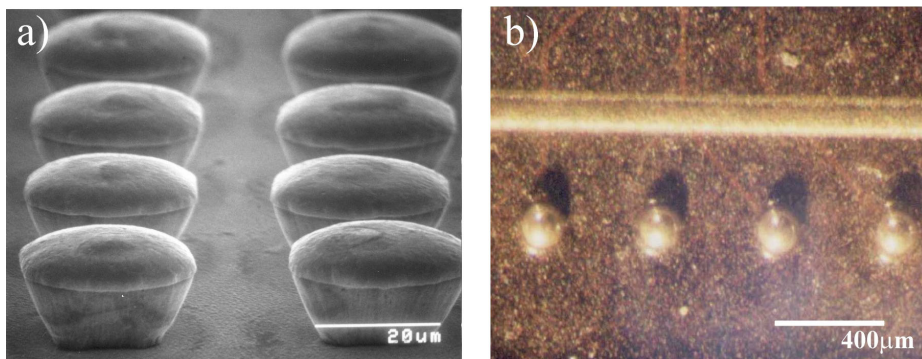


Figura 2.8: Diferents tècniques de muntatge als mòduls multixip.

El pioner de la tècnica *flip-chip* va ser IBM cap a principis dels 1960s amb el seu conegut procés  $C^4$  (*Controlled Collapse Chip Connection*) per a la seva tecnologia SLT (*Solid Logic Technology*) sobre substrat ceràmic [20]. La motivació darrera aquesta innovació era la de proporcionar connexions de baixa inductància, així com fer accessible la cara posterior del xip per a la extracció del flux de calor. Aquesta tècnica consisteix en dipositar sobre el substrat i damunt els anomenats *bump pads*, un aliatge metàl·lic soldable que al fondre's forma una bola metàl·lica o *solder bump* que proporciona el contacte elèctric entre el substrat i el xip. Durant el procés de soldadura i degut a la tensió superficial del líquid que es forma, es produeix un fenomen d'autoaliniament que fa que el xip quedi perfectament orientat amb el substrat. D'aquí ve el nom de la tècnica desenvolupada per IBM, Col·lapse Controlat de les Connexions del xip ( $C^4$ ).

Posteriorment van aparèixer d'altres tècniques de fer el *flip-chip*, utilitzant adhesius conductors, *bumps* metàl·lics o contactes a pressió. Per a la tècnica mitjançant boles de soldadura existeixen diferents mètodes de dipòsit d'aquest material sobre els *bump pads* dels substrats [21], [22], [23], [24]. A continuació descrivim algunes d'aquestes tècniques:

- **Evaporació:** El material de soldadura, normalment aliatges de Pb/Sn, es diposita per evaporació, fent servir, bé una màscara metàl·lica gruixuda (fins a 100  $\mu\text{m}$ ), bé fotoresina gruixuda, per a la definició dels pads i de l'alçada. Immediatament després es realitza la primera recuita per formar les boles.
- **Screen printing:** Aquest mètode està molt desenvolupat gràcies al creixement de la tècnica de muntatge SMD. Consisteix a fer passar a través dels motius d'una màscara, normalment metàl·lica, l'aliatge en forma de pasta de soldadura. Amb aquesta tècnica es poden aconseguir valors de *pitch* entre boles de fins a 150 $\mu\text{m}$  i fins fa poc, ha estat la tècnica més utilitzada per al dipòsit. És el procés utilitzat a la tecnologia CNM amb un *pitch*, estàndard de 400 $\mu\text{m}$ , però reduïble a 200 $\mu\text{m}$  (veure figura 2.9.b) És una tècnica molt versàtil per la gran quantitat de pastes de soldadura diferents existents al mercat. Això dona la possibilitat de treballar a diferents temperatures de recuita o amb materials lliures de plom (*Lead-free*).
- **Electroplating:** Consisteix en el dipòsit galvànic del material. Amb aquesta tècnica la quantitat de material a dipositar és molt controlable i es poden aconseguir valors de *pitch* que es troben al voltant de les 40 $\mu\text{m}$ . Els materials dipositats poden ser Pb/Sn, Sn, Au, Au/Sn o In (veure figura 2.9.a). Un dels problemes d'aquesta tècnica prové de la dificultat en l'ús de fotoresina gruixuda per a la delimitació de l'àrea dels pads [25].
- **Electroless:** Dipòsit químic generalment de níquel i d'or Aquest mètode de dipòsit és molt senzill, ja que és un mètode *maskless*, però requereix d'un pre-tractament dels pads anomenat *zincation*. A més l'alçada aconseguida amb aquest mètode és molt petita i es requereix d'un procés posterior com l'electroplating o el dipòsit d'adhesius conductors o pasta de soldadura en el substrat [26].



**Figura 2.9:** a) Fotografia SEM de bumps de Sn formats per electroplating. b) Fotografia de boles dipositades per screen-printing amb un *pitch* de 400 $\mu\text{m}$ .

La Taula 2.4 recull les dades més important per cadascun dels mètodes de dipòsit de bumps. L'elecció d'una tècnica o d'una altre dependrà de l'aplicació i de la tecnologia disponible.



Tècnica	Min. Diam. Bump ( $\mu\text{m}$ )	Min. Pitch ( $\mu\text{m}$ )	Material dels bumps	Comentaris
Evaporació	100	250	Pb/Sn	Tècnica cara
Screen-Printing	100	150	Aliatges Pb/Sn i lead-free.	Versàtil, barata
Electroplating	25	40	Sn, Pb/Sn, Sb/Ag/Sn	Estricta control del procés.
Electroless	40	70	Ni/Au, In.	Sense màscara. Necessitat de pasta al substrat

**Taula 2.4: Resum de les característiques més importants dels diferents mètodes de dipòsit de material de soldadura.**

Amb algunes tècniques de la Taula 2.4 es fa necessari el dipòsit d'una certa quantitat de pasta de soldadura al substrat perquè el flux que porten aquests productes promogui el procés de la recuita del material. El flux és un component orgànic a base de resines que dissol els òxids de Pb/Sn i millora les superfícies a soldar. Degut a que els òxids de Pb/Sn inhibeixen la soldadura i la fan més fràgil, en molts casos es dipositen també capes d'Au o d'In per sobre de l'Pb/Sn per protegir-lo de l'oxidació [27]. En altres casos s'empren tècniques de tractament amb plasma anomenades PADS (*Plasma Assisted Dry Soldering*) [28] que trenquen els òxids de la superfície de les boles de Pb/Sn, convertint-los en oxifluorurs i per tant promovent la reacció. Totes aquestes tècniques reben el nom de *Flux-less* i s'empren en aplicacions que requereixen d'un "procés net", és a dir, lliure dels residus del flux que acompanya a la pasta de soldadura.

Un cop realitzat el dipòsit de pasta de soldadura es realitza la recuita d'aquesta per fer les connexions elèctriques. La temperatura d'aquest procés sol ser d'entre uns 20-40°C per sobre la temperatura de fusió de l'aliatge metàl·lic emprat.

#### ➤ **Encapsulat de segon nivell: Encapsulat, laminat.**

Un cop realitzat l'encapsulat de primer nivell cal connectar el substrat de silici a un suport definitiu. En el cas de la tecnologia estàndard CNM, aquest és un substrat de poliimida d'una temperatura de gel,  $T_g$ , propera als 220°C, però es poden emprar bases d'encapsulat normals com la PLCC, LCC, etc. i substrats ceràmics o de potència. El procediment que es segueix comença per enganxar amb un adhesiu conductor o no, depenent de l'aplicació, el mòdul al substrat de poliimida. A continuació i per la tècnica de *wire-Bonding* es connecta el substrat de silici amb el de poliimida. Ja només falta cobrir tot el conjunt amb una tapa de plàstic, encara que per certes aplicacions pot ser de metall, i s'emplena d'una silicona, també anomenat *underfill* que protegeix tot plegat de la corrosió i augmenta la fiabilitat de les connexions *flip-chip* [29].

De la descripció donada fins a aquest punt, es pot veure que la fabricació d'un mòdul multixip amb tecnologia CNM sobre substrat de silici comporta varies tasques ben diferenciades les quals combinen diferents tècniques de fabricació, des de la tecnologia *thin-film* de silici fins a la tecnologia de muntatge sobre circuits híbrids. El conjunt d'aquestes tasques es troba recollit a la Figura 2.10.

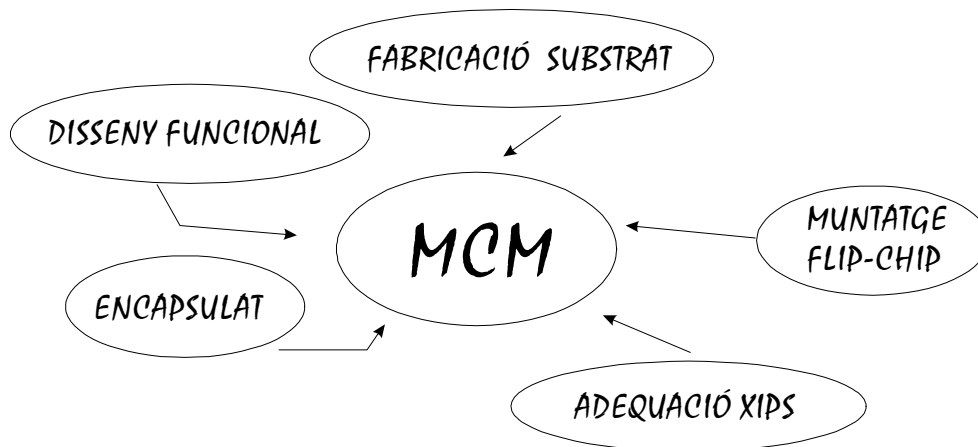


Figura 2.10: Conjunt de tasques que s'han de dur a terme en la fabricació d'un mòdul MCM-D.

Als apartats següents descrivim amb més detall totes aquestes tasques per a la tecnologia CNM-MCM.

### 2.2.3 Disseny funcional del MCM.

Per tal de treure el màxim profit dels recursos de l'encapsulat multixip quant a empaquetament i rendiment elèctric, el disseny d'un MCM ha de ser global. Això implica que el disseny de les diferents etapes, des del xip fins al PCB, han d'estar interrelacionats i que tant els elements a incloure al mòdul com les tècniques de muntatge i materials emprats, s'han d'avaluar de forma conjunta i basant-nos en el coneixement de l'aplicació per a obtenir el millor comportament possible.

### 2.2.4 Fabricació del substrat MCM.

La tecnologia de fabricació del substrat de silici és una tecnologia multimetall que combina fins a 4 nivells d'alumini amb poliimida com a dielèctric i que permet la integració, al substrat de l'MCM, de resistències, inductors i capacitats fabricades amb tècniques *thin-film*. La versatilitat d'aquesta tecnologia radica en la possibilitat d'incloure al substrat, dispositius actius de circuiteria CMOS, bipolars i/o de potència. Les etapes MCM s'afegeixen sobre els substrats de silici utilitzant les mateixes tècniques litogràfiques i de dipòsit de metalls i/o dielèctrics que les de qualsevol tecnologia microelectrònica.

Durant el procés de desenvolupament de la tecnologia CNM-MCM es van dissenyar i fabricar MCM's de test que combinaven la tecnologia CMOS25 del CNM i la tecnologia MCM. L'objectiu de la fabricació d'aquests mòduls era poder mesurar els possibles efectes dels processos MCM sobre els paràmetres elèctrics de la tecnologia CMOS. Els resultats dels runs de prova van ser plenament satisfactoris i es va poder demostrar que ambdues tecnologies són completament compatibles [30].

#### ➤ Els materials dielèctrics.

L'elecció del dielèctric és fonamental en la fabricació de mòduls multixip, doncs ha de complir alguns requisits per poder ser utilitzat en una tecnologia multimetall. A part de ser

un bon aïllant ha de tenir una constant dielèctrica petita, per a aconseguir capacitats paràsites petites en dissenys amb densitat d'interconnexió elevada. Ha de ser un material física i químicament estable, i per estructures multicapa ha de tenir una capacitat planaritzadora, que li permeti anivellar topografies abruptes.

L'ús de polímers als mòduls multixip s'ha estandarditzat vastament degut a la relativa facilitat de processat i a la gran capacitat de recobriment, i per tant de planarització, que tenen. A més a més, la constant dielèctrica propera a la de l'òxid de silici i la tensió de ruptura elevada d'aquests materials els fa idonis per actuar com a aïllants [31]. A la Taula 2.5 es mostren algunes propietats físiques per als polímers que es troben al mercat.

Nom Material	Constant dielèctrica	Tensió ruptura (V/cm)×10 <sup>6</sup>	CTE (ppm/°C)	T <sub>glass</sub> (°C)
Dupont PI 2555	3.3	>2	40	>320
Dupont PI 2732	2.9		13	<400
Hitachi PIQ-13	3.4	3	45-58	>350
Dow Chemical BCB-13005	2.7	>4	52	>350

**Taula 2.5: Magnituds físiques de diferents tipus de polímers disponibles al mercat.**

La capacitat planaritzadora d'aquests materials orgànics en topografies abruptes permet que en sistemes multicapa, com poden ser els mòduls multixip, no es produeixin tants problemes de trencament de pistes metàl·liques sobre tot a les proximitats de les vies de connexió. D'altres dielèctrics com l'òxid de silici i el nitrur de silici dipositats per PECVD poden presentar defectes i *microcracks* que afectin a l'aïllament sobretot quan la topologia del nivell inferior és molt pronunciada. Una altra característica dels polímers és que es poden dipositar en gruixos molt més grans que no pas d'altres materials de manera que el valor de les capacitats paràsites de les línies d'interconnexió es redueix considerablement.

Generalment els polímers es dipositen per *spin coating*, o centrifugat, tot i que de vegades també es fa per *spray*, o vaporització. En el cas de l'*spin coating*, la tensió superficial del líquid tendeix a deixar més material a les valls que a les crestes de manera que es produeix una reducció de les diferències d'alçada entre valls i crestes del material sota el polímer i també es suavitzen els salts verticals. Aquest fenomen s'anomena planarització i es molt convenient doncs facilita el dipòsit posterior d'alumini per sputtering, el qual té un poder de recobriment molt inferior. Aquesta tècnica permet també fàcilment el dipòsit de varies capes augmentant així el gruix final, que pot anar d'algunes micres fins a espessors propers al mil·límetre. Quant a la formulació d'aquests materials orgànics ens trobem que els polímers més utilitzats als mòduls multixip són les poliimides (PIs) i els benzociclobutens (BCB).

La poliimida utilitzada a la tecnologia CNM-MCM pertany a la sèrie PYRALIN<sup>®</sup> de DuPont (PI 2732). Es comercialitza en forma de solució líquida d'àcid poliàmic en el qual s'hi ha afegit uns grups fotoreactius que amb l'exposició a la llum UV formen enllaços amb les cadenes adjacents, mentre que la part no exposada es dissol fàcilment durant el procés de revelat [32]. Així doncs, la poliimida emprada en aquesta tecnologia té un comportament fotosensible de tipus negatiu. El material es diposita per centrifugat i el gruix aplicat típicament és de 10 a 11µm quedant reduït a unes 4 o 5µm després de tot el processat. La

capa és sotmesa després a un procés de *pre-bake* per eliminar l'excés de dissolvent, millorar l'adhesió i preparar la capa per a l'exposició. Després de l'exposició i del revelat hi ha un *post-bake* molt important i que s'ha de fer immediatament per acabar amb un procés de curat a una temperatura de 375°C durant varies hores. Hem de dir que el procés de dipòsit, insolat i curat de la poliimida té una finestra de procés molt petita, és a dir, el marge de variació de les variables controlables és molt petit, la qual cosa fa que sigui un procés fàcilment descontrolable i poc repetitiu a menys que es realitzi amb molta cura [33]. Val a dir que la informació de processat proporcionada pel fabricant de la poliimida no ha servit per establir les variables del procés i s'ha hagut de desenvolupar íntegrament al CNM.

Les principals característiques que presenta la poliimida després del procés de curat són una constant dielèctrica de 2.9 i un coeficient d'expansió tèrmica (CTE) de 13ppm/°C. Aquesta dada és molt rellevant a l'hora d'escollir quin tipus de polímer utilitzar, ja que per evitar estressos provocats per les diferents dilatacions tèrmiques dels materials del substrat, és molt recomanable que les CTEs de tots ells siguin similars. En el cas d'un substrat de silici amb una CTE d'aproximadament 3ppm/°C aquesta poliimida és la opció més indicada. D'altres valors típics de CTE pels polímers es troben entre els 25 i 50ppm/°C (veure Taula 2.5). La temperatura de gel,  $T_g$  d'un polímer també és un paràmetre a tenir en compte i es defineix com la temperatura a la qual les característiques físiques, tant elèctriques com mecàniques, del polímer comencen a variar, per exemple el CTE pot incrementar-se en gran mesura fent que hi hagi un desajust massa gran amb el CTE dels components ja instal·lats, provocant un estrès massa elevat que doni lloc a arrencaments de les connexions o d'altres problemes semblants. Pel cas de la poliimida dels mòduls MCM la  $T_g$  està al voltant dels 400°C.

Per finalitzar direm que, en general, i en comparació amb als òxids, les poliimides tenen una conductivitat tèrmica inferior i presenten menor estabilitat química i tèrmica, però sempre que es treballi a temperatures moderades, fins a 150°C, són materials adequats i perfectament estables.

#### ➤ Els elements passius integrables.

La tecnologia en silici permet la implementació de components passius aprofitant alguns dels metalls de que disposa i en alguns casos tots. D'aquesta manera podem fabricar resistències, capacitats i inductàncies tal com expliquem a continuació.

##### □ Resistències.

Les resistències integrades es fabriquen amb siliciur de tàntal,  $TaSi_2$ , un metall amb una resistivitat d'aproximadament  $300 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ . L'espessor de la capa de  $TaSi_2$  que es fa servir en aquesta tecnologia oscil·la entre 140 i 190nm doncs el que es pretén ajustar és la resistència quadre de la capa a  $20\Omega/\square$ . Amb aquest valor de resistència quadre es poden arribar a dissenyar resistències de fins a 200K $\Omega$  amb dimensions raonables per a la integració. A més el  $TaSi_2$  té un coeficient tèrmic de resistència (TCR) de només 100ppm/°C el que el fa molt adequat per la fabricació de resistències, doncs el valor dissenyat gairebé no es veurà alterat per les variacions de temperatura. L'única restricció al disseny d'aquestes resistències, apart de la grandària, és la quantitat de calor que dissipen per efecte Joule. Quan per aquestes resistències hi circulen corrents elevats, la calor generada per efecte Joule pot elevar excessivament la temperatura en un punt. El  $TaSi_2$  és un metall refractari capaç de suportar elevades temperatures, no així la poliimida que, com ja hem dit, per sobre de la seva

temperatura de gel,  $T_g$ , perd moltes de les seves propietats físiques. Estudis realitzats han determinat la potència dissipada per unitat de superfície, a partir de la qual s'aprecien canvis a les propietats de les poliimides i aquest valor és, doncs, el que determina la densitat de corrent màxima permesa que podem fer circular per les resistències de  $TaSi_2$  que és de  $2mA/\mu m$  [34].

#### □ Capacitats.

Les capacitats que es poden fabricar amb aquesta tecnologia tenen com a elèctrode inferior el siliciur de tàntal, com a dielèctric s'utilitza el nitrur de silici i com a elèctrode superior, l'alumini. Per tal d'obtenir una elevada capacitat per unitat d'àrea es necessiten dielèctrics molt prims i amb característiques d'aïllament elèctric molt bones, que s'aconsegueixen generalment amb processos LPCVD a elevada temperatura. En el cas de la nostra tecnologia el dielèctric utilitzat, nitrur de silici, es diposita per aquesta tècnica a una temperatura al voltant dels  $800^\circ C$ . Aquesta temperatura és incompatible amb la presència d'alumini, el qual té un punt de fusió inferior, i degut a això es fa servir el siliciur de tàntal com a metall per a l'elèctrode inferior. Un altre avantatge és que aquest metall no presenta una rugositat elevada i per tant la tensió de ruptura de les capacitats fabricades amb ell resulta ser molt elevada. La constant dielèctrica del nitrur de silici és de 7 i amb l'espessor de nitrur que es diposita s'obté un valor de capacitat per unitat d'àrea de  $33nF/cm^2$ . Existeix però una limitació en la grandària màxima de les capacitats fabricades amb aquesta tecnologia. Una àrea massa gran provoca un fenomen indesitjat a les poliimides situades damunt d'ella. S'ha observat l'aparició de bombolles concèntriques sobre les capacitats quan l'àrea superava els  $10mm^2$ , és a dir, que el límit factible està al voltant dels  $3nF$ .

#### □ Inductors.

En una tecnologia multimetall esdevé possible la realització d'inductors amb dos metalls o fins i tot amb quatre (dos a dos), per augmentar al doble el nombre de voltes dels inductors. La baixa constant dielèctrica del material aïllant, la poliimida, redueix considerablement les pèrdues per conducció a través de l'aïllant. També es pot millorar el factor de qualitat dels inductors fent un buidat del silici de sota mitjançant tècniques de gravat anisòtrop [35].

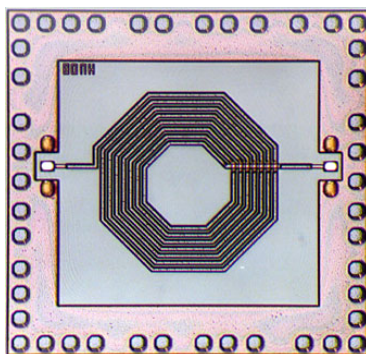


Figura 2.11: Layout d'un inductor fabricat amb tecnologia MCM.

#### □ Tecnologia de pads.

Dins un substrat MCM s'ha de distingir entre dos tipus de pads: els *bonding pads* i els *bumps pads*. Els *bonding pads* o pads de soldadura són aquells sobre els quals es fa la

soldadura amb fil convencional de la mateixa manera que en qualsevol altre dispositiu. Els *bump pads* són aquells sobre els quals es diposita la pasta de soldadura que després formarà les connexions elèctriques amb els xips muntats a sobre. Sempre que és possible els *bump pads* i els *bonding pads* es dissenyen obrint vies a través de totes les poliiimides internivell fins a arribar al substrat d'òxid de silici. Això afavoreix en el cas dels *bump pads* la conducció tèrmica, ja que la poliiimida és un material de baixa conductivitat tèrmica i les *solder bump* són el principal camí de conducció de calor per al *flip-chip*. En el cas dels *bonding pads* això també és recomanable degut a que el procés de soldat amb fil, *wire-bonding*, sobre poliiimida és un procés molt crític i amb variables molt difícils de controlar degut a les peculiars propietats del polímer [36]. La principal raó és que les poliiimides tenen una adhesió molt dolenta a gairebé totes les superfícies. Existeixen problemes d'adhesió a les interfícies substrat-poliimida, poliiimida-poliimida i poliiimida-metall. Totes aquestes s'han de tractar amb molta cura, vigilat la neteja o tractant-les amb promotors de l'adhesió. En concret l'adhesió de l'alumini sobre la poliiimida és molt dolenta, i el procés de *wire-bonding* pot fer saltar fàcilment aquest metall del *bonding pad*. Hi ha processos per intentar millorar aquesta adhesió com són augmentar la rugositat de la poliiimida amb atacs secs o humits, però el procés és molt sensible tant a les condicions d'aquests atacs com al contingut d'aigua de la poliiimida o la composició de l'alumini. Un segon motiu, no menys important, es que tenir una capa més tova sota el pad d'alumini pot dificultar el procés de *wire-bonding*. Per tots aquests motius es fa més recomanable tenir sota els pads de soldadura un substrat més dur com és l'òxid de silici.

Una altra característica a tenir en compte a la tecnologia MCM és la metal·lització final. L'alumini, el metall de les tecnologies microelectròniques convencionals, és un material que no forma soldadura amb la pasta de soldadura utilitzada en el muntatge *flip-chip*. Per a obtenir un bon contacte elèctric s'afegeix una metal·lització soldable als *bump pads* que típicament està formada per un conjunt de tres capes de metall. La primera capa és promotora de l'adhesió i a la vegada actua com a barrera de difusió de la pasta de soldadura que en contacte amb l'alumini podria perjudicar el contacte. La segona capa sol ser d'un material soldable que formi un bon contacte elèctric amb el *solder* utilitzat, per a l'elecció d'aquest metall s'ha de tenir en compte quin tipus d'aleatge de soldadura es pretén utilitzar. I per últim es sol dipositar una capa que proporcioni passivació a aquesta metal·lització i la protegeixi de la corrosió. Els materials més utilitzats en aquesta triple metal·lització són [3]:

- Capa adhesió / barrera: Ti, Cr.
- Capa soldable: Cu, Ni, Pd, Ag.
- Capa protecció: Au.

La definició d'aquesta metal·lització final es sol dissenyar més gran que l'obertura de contacte, és a dir, es fa coincidir l'obertura de la poliiimida per tal d'evitar l'entrada de flux o de soldadura a la terminació d'alumini, cosa que provocaria importants problemes de fiabilitat.

Així doncs fem notar que aquesta tecnologia es basa en uns processos comuns com són la definició de resistències integrades *thin-film* de siliciur de tàntal, capacitats *thin-film* de nitrur de silici, una metal·lització alumini-poliimida multicapa i metal·lització soldable, i que per tant aquests processos poden ser utilitzats en una àmplia varietat de configuracions que permeten diferents aplicacions. Cadascuna d'aquestes configuracions comporta petites variacions en el procés tecnològic i per tant, segons el substrat MCM contingui només components passius i línies d'interconnexió o contingui, a més a més, dispositius actius

estarem parlant de la Tecnologia MCM Pura o bé de la tecnologia CNM25&MCM ó CNM25-MCM.

#### 2.2.4.1 Tecnologia MCM Pura.

Ens referirem a tecnologia MCM Pura quan a la fabricació del substrat MCM es contempli només la definició i estructuració de línies d'interconnexió i dispositius passius integrats. Sobre un substrat de silici verge es fa créixer una capa d'òxid de silici i sobre aquesta es dipositaran, les capes alternants de poliimida i alumini, així com les capes necessàries de siliciur de tàntal i de nitrur de silici per a la implementació dels dispositius passius. Aquesta variant de la tecnologia permet fins a un màxim de quatre nivells de metall (veure Figura 2.12). Les aplicacions d'aquesta variant de la tecnologia poden ser:

- **Aplicacions digitals.** En aquest cas el substrat conté una elevada densitat de línies d'interconnexió i eventualment resistències *pull-up* i *pull-down*.
- **Aplicacions analògiques.** S'integren al substrat resistències i capacitats per aplicacions de filtres analògics.
- **Aplicacions de radiofreqüència i microones.** En aquest cas la integració d'inductors requereix substrats altament resistius i un processat addicional d'aquests per tal d'eliminar pèrdues a través del substrat. El principal ús dels inductors integrats és per a la implementació de filtres.

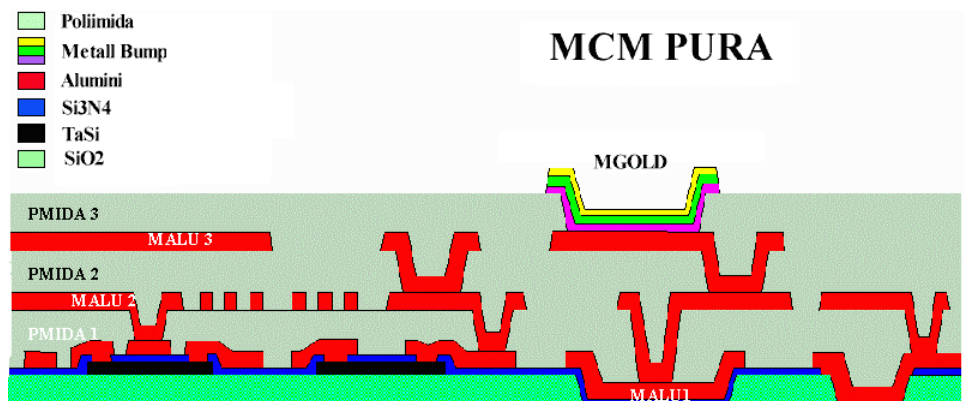


Figura 2.12: Dibuix d'una secció transversal de les etapes MCM per a la tecnologia MCM Pura.

#### 2.2.4.2 Tecnologia CNM25&MCM.

A aquesta variant tecnològica, sobre un substrat fabricat amb tecnologia CMOS-CNM25 s'hi afegixen les etapes MCM de definició de resistències  $Ta_2Si$  i línies d'interconnexió. Així doncs un cop acabada l'etapa de definició del metall CMOS es diposita i grava la capa de siliciur de tàntal i a continuació es diposita la primera capa de poliimida.

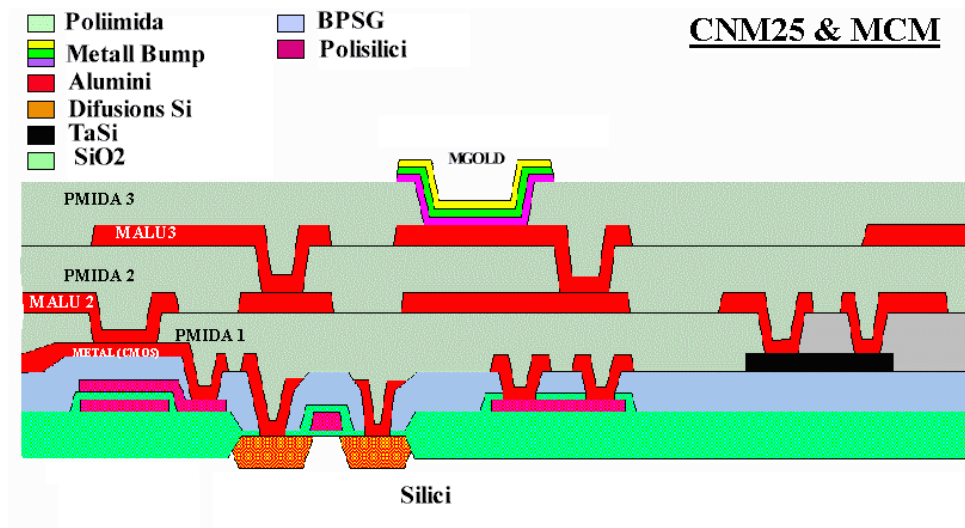


Figura 2.13: Dibuix d'una secció transversal de les etapes MCM per a la tecnologia CNM25&MCM.

### 2.2.4.3 Tecnologia CNM25-MCM.

Aquesta variant és la de més complexitat tecnològica ja que combina un substrat actiu amb la integració de capacitats de nitru i resistències. Degut al fet de que el dielèctric de les capacitats, nitru de silici, es diposita a 800°C, no és possible realitzar el procés CMOS completament independent del procés MCM. Així doncs tant l'obertura de contactes com el dipòsit i gravat del metall es realitzen amb posterioritat al dipòsit del nitru de silici.

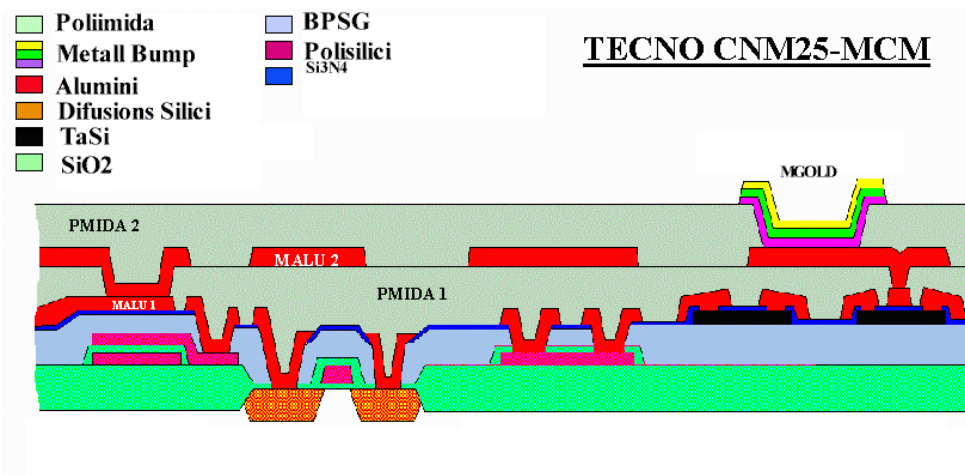


Figura 2.14: Dibuix d'una secció transversal e les etapes MCM per a la tecnologia CNM25-MCM.

Les aplicacions d'aquestes dues últimes variants tecnològiques són molt àmplies i variades, però degut al seu més elevat cost i complexitat solen ser utilitzades per aplicacions específiques d'elevades prestacions.



### 2.2.5 Adequació dels xips comercials.

En qualsevol IC comercial els *pads* de connexió, o *bonding pads* estan situats al llarg de la perifèria del xip amb un *pitch* entre ells cada vegada més petit. En la major part dels casos aquest *pitch*, habitualment inferior a les 150 micres, és massa petit per al dipòsit de pasta de soldadura mitjançant el procés d'*screen-printing*, el que fa necessari una redistribució d'aquests *pads* de contacte cap a un *array* de *pads* més separats i que proporcioni més estabilitat mecànica al muntatge. Per portar a terme aquesta redistribució de *pads* es diposita una capa aïllant, en aquest cas poliimida sobre la passivació, i es dissenyen pistes de connexió fins a un *array* de *pads* al centre del xip amb la separació suficient per a poder realitzar amb seguretat el procés d'*screen-printing*. A la tecnologia del CNM el valor adoptat de *pitch* és de 400µm. El fet d'utilitzar poliimida com a aïllant és degut a que la passivació PECVD dels circuits integrats no està pensada per a ser utilitzada com a dielèctric internivell i per tant és de pobre qualitat, podent presentar fins i tot *micro-cracks* i forats que provoquin un curtcircuit. Una altra característica que cal modificar en els xips comercials és l'acabat dels *pads* de soldadura. Aquests han d'estar acabats amb una tricapa de metalls soldables tal i com s'ha descrit a l'apartat anterior pels *bump pads* del substrat.

Així doncs el condicionament d'un xip comercial al muntatge *flip-chip* suposa un afegit de quatre etapes addicionals:

- Dipòsit i gravat de la primera capa de poliimida.
- Definició de línies de connexió d'alumini cap a l'*array* de *pads*.
- Estructuració d'una segona capa de poliimida.
- Disseny de la metal·lització final dels *pads*.

Tots aquest processos s'han de dur a terme sobre oblia, i per tant, els components comercials s'han d'adquirir en aquest format. Degut a que els mòduls multixip estan encara en una etapa de desenvolupament a nivell de transferència a la indústria no es troben disponibles, per part dels fabricants, *data sheets* amb la informació necessària per a un dissenyador MCM. Així doncs, en adquirir dispositius en format oblia s'ha de tractar directament amb el venedor perquè faciliti aquesta mena d'informació "especialitzada". Hi ha empreses que no solen proporcionar aquesta informació, per raons de confidencialitat, o perquè al no ser informació estàndard, dins una empresa gran tenen problemes bé per generar-la, bé per identificar-la. Generalment passa que la informació facilitada és insuficient per a la realització del disseny o no es dona amb la precisió requerida. En casos extrems, pot succeir que aquesta no correspongui al component o a la versió del component sol·licitat. La manca d'aquesta mena d'informació per part del proveïdor pot ser causa d'importants retards al disseny global MCM.

Un altre dels problemes que es plantegen al muntatge MCM és distingir a la oblia els xips funcionals dels que no ho són, el problema de distingir els KGD (*Known Good Dice*), o xips dels quals se sap que han passat amb èxit tots els tests elèctrics i de fiabilitat de igual manera que un xip encapsulat. Aquesta informació també li ha de ser requerida al fabricant.

Un xip encapsulat sol passar tres tipus de test abans no es certifica la seva funcionalitat. Primer la oblia passa per un test bàsic que consisteix en mesures DC de paràmetres bàsics. A continuació l'oblia es talla i els xips encapsulats passen pel test de *Burn-in* que provoca la mortalitat infantil dels components defectuosos. Per últim es realitza un test funcional complet en el que es mesuren totes les seves característiques més rellevants per tal que

compleixi les especificacions del producte. Aquests dos últims tests es realitzen amb els xips ja encapsulats i per tant no es duen a terme amb els bare dies. L'únic test que solen dur a terme els fabricants i proveïdors de *bare dies* és el DC sobre oblia que discrimina els xips defectuosos, els quals es marquen amb un punt de tinta.

Degut al continu creixement de la indústria de mòduls multichip, s'ha observat la necessitat d'estandaritzar les dades que es reben per part dels proveïdors de *bare dies* per facilitar l'intercanvi d'informació i per fer-la fàcilment implementable a un sistema computeritzat de *rerouting* automàtic. A aquest format estàndard se li diu DIE (*Die Information Exchange*).

### 2.2.6 Aplicacions de l'encapsulat MCM-D.

Actualment els mòduls multixip tenen uns camps d'aplicació molt amples que van des dels ordinadors, tant PCs com *mainframes*, fins les aplicacions militars, sistemes de commutació per xarxes telefòniques, els ATM, càmares de vídeo, sistemes de navegació, agendes electròniques i automòbil.

El camp més important d'aplicació per als MCM-D històricament ha estat el de productes d'altres prestacions o de gran nombre d'interconnexions. Això és degut al fet de que la tecnologia involucrada en la fabricació d'un mòdul multixip de tipus D és d'elevat cost i per tant els productes manufacturats en aquest tipus d'encapsulat han de ser, bé aplicacions específiques on el cost no tingui tanta rellevància, per exemple les aplicacions pel camp militar o aeroespacial, o bé per aplicacions on les prestacions primen sobre el preu, com per exemple en el camp de la supercomputació. L'exemple més evident d'això ho trobem en la tecnologia de fabricació d'Intel per la seva família de processadors Pentium® Pro.

Una de les aplicacions de més interès científic és la utilització de mòduls multixip per a la fabricació de sistemes de sensors de radiació. Aquests sistemes, que s'utilitzen en experiments de física d'altres energies com l'ATLAS, estan formats pel detector, amb una àrea activa de 16.4mm×60.4mm, sobre els quals es munten, mitjançant connexió *flip-chip* de pitch ultra fi, els xips de lectura i de transmissió de dades [37].

Els MCM-D també estan presents en aplicacions on l'interès està en la combinació de xips fabricats en diferents tecnologies, com pot ser la combinació de dispositius de potència amb circuits CMOS. En aquest projecte el substrat multixip estava format pel xip de potència de conducció vertical, amb una capacitat en corrent de fins a 15A, amb el xip de control de porta del dispositiu i xips de mesura de la temperatura [38].

## 2.3 Referències.

- [1] J. Barton, G. McCarthy, R. Doyle, K. Delaney, E. Cabruja, M. Lozano, A. Collado, J. Santander, (2001) *Reliability Evaluation of a Silicon-on-Silicon MCM-D Package*, Microelectronics Reliability, vol. 41, pp. 887-899.
- [2] E. Cabruja, M. Lozano, J. Santander, A. Collado, M. Ullán, E. Lora-Tamayo, (1999) *Thermal Behaviour Analysis of an MCM-D Technology*, Proceedings of HDP &

- MCMs '99. International Conference on High Density Packaging & MCMs. USA, pp. 301-304
- [3] J. A. Plaza, J. Esteve, (1997) *Simple Technology for Bulk Accelerometer based on BESOI wafers*. Proceedings of Eurosensors'97, Poland, pp. 1231-1232.
- [4] H. Seidel et al., (1990) *Capacitive Silicon Accelerometer with Highly Symmetrical Design*, Sensors And Actuators A, vol. 21-23, pp. 312-315.
- [5] C. S. Smith, (1954) *Piezoresistive Effect in Germanium and Silicon*, Physical Review, vol. 94, pp. 42
- [6] M.-H. Bao, (2000) *Basic Mechanics of Beam and Diaphragm Structures, A: Micro mechanical transducers: pressure sensors, accelerometers, and gyroscopes*. Amsterdam: Elsevier. p. 23-88. (Handbook of sensors and actuators ; 8). ISBN 0-444-50558-X.
- [7] H. Seidel et al., (1990) *Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions*, Journal of the Electrochemical Society, vol. 137, nº 11, pp. 3612-3626.
- [8] A. Merlos, E. Cabruja, J. Esteve, (1995) *New Technology for Easy and Fully IC-Compatible Fabrication of Back-Side contacts ISFET's*, Sensors and Actuators B. Chemical, vol. 24-25, nº.1-3, pp. 228-231
- [9] M. Bao, Chr. Burrer, J. Esteve, J. Bausells, S. Marco, (1993) *Etching Front Control of <100> Strips for Corner Compensation*, Sensors and Actuators A, vol. 37-38, pp. 717-732.
- [10] C.H. Mastrangelo, W.C. Tang, (1994) *Semiconductor Sensor Technologies, A: S. M. Sze (ed.). Semiconductor sensors*. New York: John Wiley & Sons. p. 17-95. ISBN 0-471-54609-7
- [11] R. H. V. Allen, S. C. Terry and D. W. de Bruin, (1989) *Accelerometer Systems with Self-Testable Features*, Sensors and Actuators, vol. 20, pp. 153-161.
- [12] G. Wallis and D. L. Pomerantz, (1969) *Field Assisted Glass-Metal Sealing*, Journal of Applied Physics, vol. 40, p. 3946-3949.
- [13] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), (2000) *Método no Destructivo para la Determinación de la Calidad de la Soldadura Anódica y Mejora de Contactos*. J.A. Plaza; J. Esteve; E. Lora-Tamayo. España, patente de invención 2141008, 2000-03-01.
- [14] Sabrie Soloman, (1999) *Automotive Applications of Low-G Accelerometers and Angular Rate Sensors, A: Sensors handbook*. New York : McGraw-Hill. p. 52.1-52.10. ISBN 0-07-059630-1.
- [15] Austriamicrosystems AG, (2001) *AGAS8310 Low g Accelerometer* [en línia]. Schloss Premstätten, Austria: Austriamicrosystems AG. [Consultat: 21 novembre 2002]. Disponible a Internet: [http://www.austriamicrosystems.com/04segments/automotive/pdfs/AS8310\\_Low\\_g\\_Accelerometer.pdf](http://www.austriamicrosystems.com/04segments/automotive/pdfs/AS8310_Low_g_Accelerometer.pdf)
- [16] J.C. Lötters, W. Olthuis, P.H. Veltink, P. Bergveld, (1995) *On the Design of a Triaxial Accelerometer*, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 5, pp.78-81.
- [17] E. Cabruja; E. Lora-Tamayo. (1997) *Módulos multichip: Un Encapsulado Polivalente de Altas Prestaciones*. CDE'97: 1ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos, Barcelona: Servei de Publicacions de la UPC, pp. 143-148.

- [18] R.R. Tummala, E.J. Rymaszewski (eds.), (1989) *Microelectronics Packaging Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN 0-442-20578-3.
- [19] M. Pecht, (1994) *Integrated Circuit, Hybrid, and Multichip Module Package Design Guidelines: A Focus on Reliability*, New York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-59446-6.
- [20] E.M. Davis et al., (1964) Solid Logic Technology: Versatile High Performance Applications, IBM J. Res. Develop., 8: p 102.
- [21] M. Lozano, E. Cabruja, A. Collado, J. Santander, M Ullán, (2001) *Bump Bonding of Pixel Systems*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 473, pp. 95-101.
- [22] J.H. Lau (ed.), (1996) *Flip Chip Technologies*, New York: McGraw-Hill ISBN 0-07-036609-8.
- [23] Report del FhG-IZM. [http://mst.tu-berlin.de/group-ostmann/PDF\\_DATA/specific.pdf](http://mst.tu-berlin.de/group-ostmann/PDF_DATA/specific.pdf)
- [24] Edward K. Yung and Iwona Turlik, (1991). *Electroplated Solder Joints for Flip-Chip Applications*. IEEE Transact. Components, Hybrids and Manufacturing Technology, vol. 14, n° 3 pp. 549-559.
- [25] CIRRUS IST99-10023. *Chip Interconnect with Reduction of Real state Using micro-Substrates*.
- [26] A. Ostmann, J.Simon, and H. Reichl, (1993) *The Pre-Treatment of Al Bondpads for Electroless Nickel Bumping*, Proceedings of the IEEE MCM Conference, Santa Cruz, pp. 74-78.
- [27] C. Y. Wang, Y. C. Chen C. C. Lee, (1993) *Directly Deposited Fluxless Lead Indium-Gold Composite Solders*, IEEE Transac. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, vol. 16, n° 8, pp. 789-793.
- [28] N. Koopman, S. Bobbio, S. Nangalia, J. Bousaba, and B. Piekarski, (1993) *Fluxless Soldering in Air and Nitrogen*, ECTC, Orlando.
- [29] D. Suranarayana et al., (1990) *Flip-chip Solder Bump Fatigue Life Enhanced by Polymer Encapsulation*, Proc. of 40<sup>th</sup> ECTC, vol. 1, pp. 338-344.
- [30] *Deliverable 2.1. Library for Assessing Technology Manual*. Projecte SUMMIT (EP-20492). (1998)
- [31] Philip E. Garrow, Iwona Turlik, (1998) *MCM-D Thin Film Materials Processes and Applications*, A: *Multichip Module Technology Handbook*. New York: Mc Graw-Hill. p. 3.1-3.78. ISBN 0-07-022894-9.
- [32] Philip Garrou, (1992) *Polymer Dielectrics for Multichip Module Packaging*, Proc. of the IEEE, vol. 80, n° 12, pp. 1942-1954.
- [33] R.C. Frye, (1998) Comunicació privada.
- [34] R.C. Frye et al., (1992) *Silicon-on-Silicon MCMs with Integrated Passive Components*, Proc. IEEE Multichip Module Conference, Santa Cruz, CA., pp. 155-158.
- [35] P. Losantos Viñolas, (1998) *Desenvolupament de Sensors de Camp Magnètic i Dispositiu de Radio Freqüència amb Tecnologies de Silici*, Tesi Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. Facultat de Ciències.

- [36] H.K. Charles Jr. et al. (1998) *Wirebonding: Reinventing the Process for MCMs* 1998 Int. Conf. Multichip Modules and High Density Packaging. Denver (USA) pp. 300-302.
- [37] M. Töpfer et al., (1999) *Fabrication of a High-Density MCM-D for a Pixel Detector System using a BCB/Cu Technology*, Int. Conference on High Density Packaging and MCMs, MCM'99, Denver, Colorado, USA, pp. 295-300.
- [38] A. Collado, X. Jordà, E. Cabruja, P. Godignon, (2000) *MCM-D Package for Power Applications*, International Workshop on Integrated Power Packaging. Boston, USA.